

**Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava**

**Hornicko-geologická fakulta**

**INSTITUT ENVIRONMENTÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

**Možnosti recyklace odpadu pocházejícího z činnosti abrazivního  
kapalinového paprsku**

Possibilities of recycling waste materials derived from the activity  
of abrasive liquid jet

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Autor:**

Bc. Jana Repková

**Vedoucí diplomové práce:**

Mgr. Petr Jandačka, Ph.D.

Ostrava 2012

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jana Repková**  
Studijní program: **N2102 Neroztavné suroviny**  
Studijní obor: **3904T022 Zpracování a zneškodňování odpadů**  
Téma: **Možnosti recyklace odpadu pocházejícího z činnosti abrazivního kapalinového paprsku**  
**Possibilities of Recycling Waste Materials Derived from the Activity of Abrasive Liquid Jet**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod a cíl diplomové práce
2. Teoretická část
  - 2.1 Kapalinový paprsek
  - 2.2 Magnetické vlastnosti látek
  - 2.3 Magnetické separátory
3. Praktická část
  - 3.1 Metody práce
  - 3.2 Výsledky
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. JANDAČKA, P. Měrné povrchové energie křehkých látek pro účely ovlivňování kvality povrchu. Diplomová práce, VŠB-TUO, Ostrava 2010.
2. MECHLOVÁ, E. a kol. Výkladový slovník fyziky. Prometheus, Praha 1999.
3. RIES, J.: Stroje pro zpracování odpadů. VŠB-TUO, Ostrava 2007.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Petr Jandačka, Ph.D.**

Datum zadání: **31.10.2011**

Datum odevzdání: **30.04.2012**

  
prof. Ing. Vojtěch Dírner, CSc.  
vedoucí institutu



  
prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.  
děkan fakulty

## Prohlášení

- Celou diplomovou práci včetně příloh jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu. Ve své programové aplikaci jsem použila pramenů, které jsem uvedla v seznamu použité literatury.
- Byla jsem se seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 20. 4. 2012



Jana Repková

**Poděkování:**

Ráda bych poděkovala vedoucímu své diplomové práce panu Mgr. Petrovi Jandačkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, vedení a cenné rady, které mi při vypracování této závěrečné práce poskytnul a také Ing. Petrovi Hlaváčkovi za vstřícnost a spolupráci při získávání informací k této problematice.

## **Anotace**

V této diplomové práci je analyzována problematika recyklace vybraných práškových minerálů, používaných jako abrazivo při obrábění materiálů kapalinovým paprskem. Jako hlavní recyklační technologie je v práci teoreticky posuzována magnetická separace. Výslednému návrhu postupu recyklace předchází měření magnetických vlastností abraziv pomocí vibračního magnetometru (VSM), určení magnetických susceptibilit a teoretický popis modelového chování jednotlivých práškových zrn v separátoru. Jako nevhodný materiál pro magnetickou separaci se díky svým magnetickým vlastnostem jeví zirkon.

**Klíčová slova:** abraziva, separace, recyklace, susceptibilita, almandin, olivín, zirkon, chromit

## **Summary**

In this thesis is analyzed the problem of recycling of selected powder minerals used as the abrasive in abrasive water jets. As the main recycling technology is at work theoretically evaluated magnetic separation. The resulting design recycling process prevent measurement of magnetic properties of abrasives using a vibrating sample magnetometer (VSM), determination of magnetic susceptibility and the theoretical description of the model behavior of individual powder grains in the separator. As an unsuitable material for magnetic separation, due to its magnetic properties is appearing a zircon.

**Keywords:** abrasives, separation, recycling, susceptibility, almandine, olivine, zircon, chromite

## **Seznam použitých zkratek**

AWJ            Abrasive Water Jets (abrazivní vodní paprsek)

č.             číslo

ČR            Česká republika

stol.          století

min.          minuta

n. l.          našeho letopočtu

## Obsah

1.	Úvod (cíl a obsah práce)	1
2.	Teoretická část	2
2.1	Obecná terminologie	2
2.2	Kapalinový paprsek	4
2.2.1	Základní rozdělení obrábění materiálu:	6
2.2.2	Technické parametry	9
2.3	Magnetické vlastnosti látek	10
2.3.1	Přírodní a umělé magnety	11
2.3.2	Diamagnetismus	11
2.3.3	Paramagnetismus	12
2.3.4	Feromagnetismus	12
2.3.5	Ferimagnetismus	14
2.3.6	Antiiferomagnetismus	14
2.3.7	Rozdělení látek podle velikosti měrné magnetické susceptibility	14
2.3.8	Základní magnetické veličiny a jejich jednotky	15
2.3.9	Magnetizační křivky	16
2.4	Magnetické separátory	19
2.4.1	Vysokointenzitní magnetické separátory	22
2.4.2	Nízkointenzitní magnetické separátory	25
3.	Praktická část	29
3.1	Materiál a metody práce (odběr vzorků, popis postupu práce)	29
3.1.1	Materiál	29
3.1.2	Metody práce	33
3.2	Výsledky	34
3.2.1	Magnetizační křivky	34
3.2.2	Určení susceptibility	37
3.2.1	Popis modelového chování studovaných materiálů v jednoduché konstrukci magnetickém separátoru	40
3.2.2	Kvalitativní popis separace směsi materiálů	47
3.3	Závěr	50
	Použitá literatura	51
	Seznam obrázků	54

Seznam tabulek .....	55
----------------------	----



# 1. Úvod (cíl a obsah práce)

Pro svou diplomovou práci jsem si vybrala téma: „Možnosti recyklace odpadu pocházejícího z činnosti abrazivního kapalinového paprsku“, jež má úzkou souvislost s mým studijním oborem „Zpracování a zneškodňování odpadů“. Je to téma vztahující se k životnímu prostředí, a to nám nesmí být lhostejné.

Většina lidské činnosti je doprovázena vznikem odpadů. V některých případech lze „odpad“ využít jako významný zdroj druhotných surovin pro obsah užitkových složek v tomto odpadu.

Kal pocházející z interakce řezaného, čištěného nebo jinak obráběného materiálu a abrazivního kapalinového paprsku obsahuje mimo částice děleného materiálu také abrazivní zrna různých velikostí. Získání abrazivních zrn z kalu je důležité zejména z důvodu snížení hmotnosti a objemu kalu, který se ukládá na skládky. Recyklované abrazivo může být opět použito v procesu řezání abrazivním kapalinovým paprskem jako tzv. druhotná surovina.

Z environmentálního hlediska je tedy recyklace abrazivního materiálu určitě přínosem, neboť při 8 hodinovém denním provozu běžného paprsku určeného pro obrábění menších kusů materiálů zůstane za dvacet pracovních dní v lapači (vaně) přes 3 tuny abraziva. Abraziva dosud nejsou v současné době v České republice recyklovány a jsou problémem pro životní prostředí.

V diplomové práci jsem se zaměřila výhradně na magnetickou separaci čtyř druhů, abrazivních materiálů - almandinu, olivínu, chromitu a zirkonu a možnost využití jejich magnetického rozdělování.

## Cíl

Cílem práce je analýza možností recyklace abrazivních materiálů, používaných při obrábění materiálu vysokorychlostním abrazivním kapalinovým paprskem, založená na magnetické separaci.

## 2. Teoretická část

V teoretické části jsou uvedeny výhradně převzaté poznatky. Je rozdělena na části obecná terminologie, abrazivní kapalinový paprsek, magnetické vlastnosti látek a magnetické separátory. Jednotlivé podkapitoly jsou doprovázeny přesným popisem dané problematiky.

### 2.1 Obecná terminologie

#### Odpad

*„Odpad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze č. 1 k tomuto zákonu.“*  
[1]

#### Odpadové hospodářství

*„Činnost zaměřená na předcházení vzniku odpadů, na nakládání s odpady a na následnou péči o místo, kde jsou odpady trvale uloženy, a kontrola těchto činností.“* [1]

#### Recyklace odpadů

*„Jakýkoliv způsob využití odpadů, kterým je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky pro původní nebo jiné účely jejich použití, včetně přepracování organických materiálů; recyklací odpadů není energetické využití a zpracování na výrobky, materiály nebo látky, které mají být použity jako palivo nebo zásypový materiál.“* [1]

#### Magnetismus

*„Fyzikální jev projevující se primárně silovým působením na pohybující se nositele elektrického náboje (nabitě částice). Důsledkem tohoto působení jsou např. silové působení na (i nenabitá) tělesa (nejsilnější u feromagnetických látek) či změny elektrických, optických a dalších materiálových a termodynamických charakteristik látek vystavených magnetickému působení. Magnetismus je vytvářen pohybem elektrického*

*náboje nebo změnou elektrického pole v čase. Elektromagnetismus, tedy sloučení magnetismu a elektrické síly je jednou ze čtyř základních interakcí.“ [2]*

### **Abrazivo (abrazivní materiál)**

*„Abraziva jsou drobná zrnka minerálů [3].“*

### **Velikost částic v mesh**

*„Číslo mesh vyjadřuje počet otvorů v sítu na lineární palec. Dodávané prášky bývají označovány jediným číslem mesh. Například materiál 80 mesh znamená, že v dodávaném prášku jsou nejmenší částice, které mají stejnou velikost, jako otvory v sítu s označením 80 mesh, tj. 177  $\mu\text{m}$ .“ [3]*

### **Historie kapalinového paprsku**

Historie kapalinového paprsku má kořeny již v dávné minulosti. Rozvoj řezání kapalinovým paprskem pak propukl v půlce dvacátého století. V padesátých letech 20. století se začalo experimentovat s využitím síly kapalinového paprsku při řezání dřeva. Až v sedmdesátých letech 20. stol., kdy se do paprsku vody začala vnášet abraziva, začalo široké použití. [4]

Opravdový začátek užití řezání kapalinovým paprskem spadá do devatenáctého století. Tehdy tuto metodu používali kalifornští zlatokopové k odstranění vrstev kamení a nánosů písku. Používali pouze systémy nízkotlaké. Ve dvacátých letech 19. století se začali používat kapalinové trysky k oddělení horniny a písku ve stavební činnosti. Kapalinové trysky umožňují dosahovat velkých rychlostí s tlakem několika desítek až stovek barů. První patent aplikace kapalinového paprsku souvisel s vrtáním děr v báňském průmyslu - Rusko. Rozvoj metody vodního paprsku a její pozdější užití měl na starost Petr Tupitsyn. Roku 1936 Petr Tupitsyn aplikoval kapalinový paprsek na řezání děr uhelných slojí. Mezi roky 1950 až 1960 se zvýšila potřeba těžít uran, kapalinový paprsek vyloučil určitá rizika spojená s těžbou. Tímto se obnovil zájem o aplikaci vody jako řezné směsi s tryskami o vysokém tlaku. V padesátých letech 20. století zkoušel Dr. Norman Franz,

inženýr lesního hospodářství, řezání kapalinovým paprskem. Dr. Franz byl průkopníkem, který jako první studoval využití velmi vysokého tlaku vody jako řezného prostředku. Vysoký tlak vody musí být větší než 30000 liber na čtvereční palec (1 PSI = 6895 Pa). Z tohoto důvodu je Dr. Franz považován za průkopníka kapalinového paprsku. Své studium zasvětil kontinuálnímu proudu vody. V roce 1971 se zrodilo první komerční použití. Technologie kapalinového paprsku se zdokonalila v sedmdesátých letech, kdy Dr. Mohamed Hashish přišel na techniku, kdy se k vodnímu paprsku přidává abrazivo, tímto se umožní řezání i materiálů s větší tloušťkou. [5]

## 2.2 Kapalinový paprsek

Kapalinový paprsek a abrazivní kapalinový paprsek slouží k obrábění materiálů [3]. Je to tedy nástroj pro dělení materiálu nebo jeho „složitějšímu obrábění“. Kapalinové paprsky, někdy též označovány jako vodní, mají velkou výhodu v tom, že při standardním použití je není možno zničit a není ani ohrožen pohyb, který vyvoluje strojní zařízení. Další velkou výhodou vodního (kapalinového) paprsku je fakt, že řez je téměř chladný, protože při vzájemném působení paprsku s látkou dochází k přírůstku teploty jen v mikroskopickém objemu, který odpovídá dotyku abrazivního zrna s dělenou (obráběnou) látkou. Obrovským kladem kapalinového paprsku je také docela dost vysoká tloušťka materiálu, kterou lze hodnotně prořezat a jednoduchá schopnost regulace i řízení. To umožňuje použití v automatizovaných provozech i na robotech. [6] Při řezání se nevytváří prach a ani není zapotřebí předem vyvrtat díru před opracováním tvaru [7]. Abrazivní kapalinový paprsek, který se používá k obrábění materiálu v Ostravě – Porubě, v Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., je zobrazen na obrázku 1 a 2.

Základní rozdělení vodního paprsku [6, 8]:

### 1. Kontinuální

- abrazivní

→ AWJ vodní abrazivní paprsek – tzv. „vstřikovaný“ abrazivní kapalinový paprsek, který vzniká nasáváním směsi vzduchu a abraziva za pomoci podtlaku ve směšovací komoře, kde se voda mísí s tímto abrazivním materiálem a vzduchem

→ ASJ paprsek abrazivní suspenze – vzniká pomocí vytlačování směsi kapaliny s abrazivním materiálem z tlakové nádoby

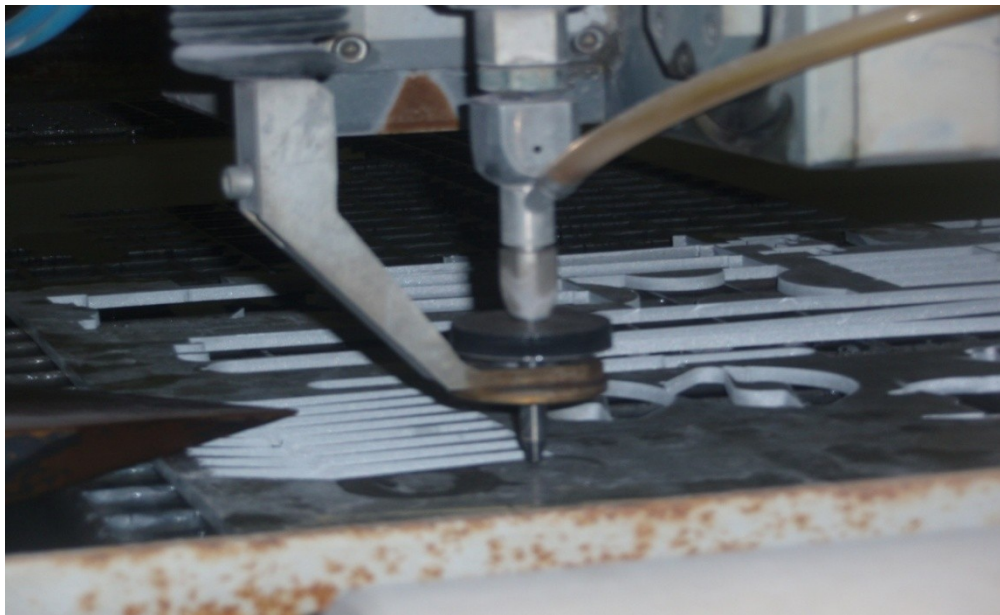
- čistý – účinnost pro velmi měkké nebo tenké materiály (př. guma, polystyren, atd.) nebo např. pro čištění ploch od rzi
- ultravysokotlaký
  - abrazivní
  - čistý
- kavitační - ačkoliv má výraznější účinek při porušování materiálu, je nevhodný pro přesné obrábění
- kryogenní – používá se tekutý dusík namísto vody, kryogenní paprsek pracuje obdobně jako kapalinový a užívá se např. pro materiály nesnášející vodu

## 2. Diskontinuální

- pulzní – má výraznější účinek při destrukci materiálu, avšak není vhodný pro potřebné přesné obrábění
  - přerušovaný
  - nízkofrekvenční
- modulovaný – nevhodný pro přesné obrábění, má výraznější účinek při destrukci materiálu



Obrázek 1 - abrazivní kapalinový paprsek v Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i.



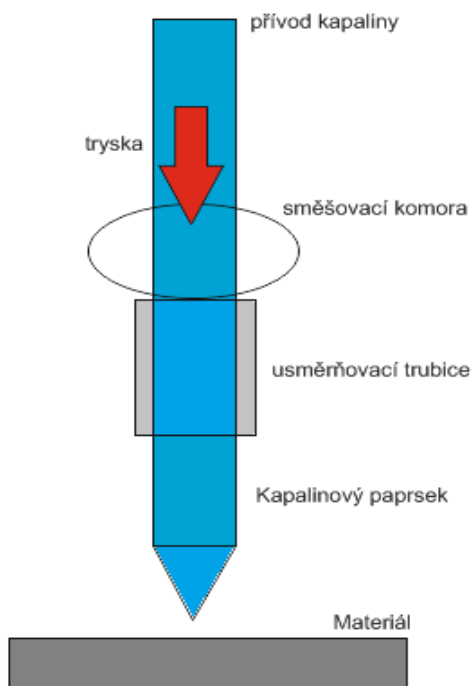
Obrázek 2 – zblízka hlava abrazivního kapalinového paprsku v Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i.

### **2.2.1 Základní rozdělení obrábění materiálu:**

- 1) Obrábění pomocí čistého kapalinového paprsku
- 2) Obrábění za pomoci abrazivního kapalinového paprsku

### Obrábění pomocí čistého kapalinového paprsku

Řezání pomocí čistého kapalinového paprsku se dnes používá především pro obrábění nekovových a měkkých materiálů, např. azbestocement, lamináty, gumotextil, sklotextil a grafitové kompozity. Rychlost řezání je v rozsahu kolem  $5 \text{ m.min}^{-1}$  (u laminátů) až  $400 \text{ m.min}^{-1}$  (u papíru, lepenky atd.). [5] Řezání pomocí čistého kapalinového paprsku je zobrazeno na obrázku 3.



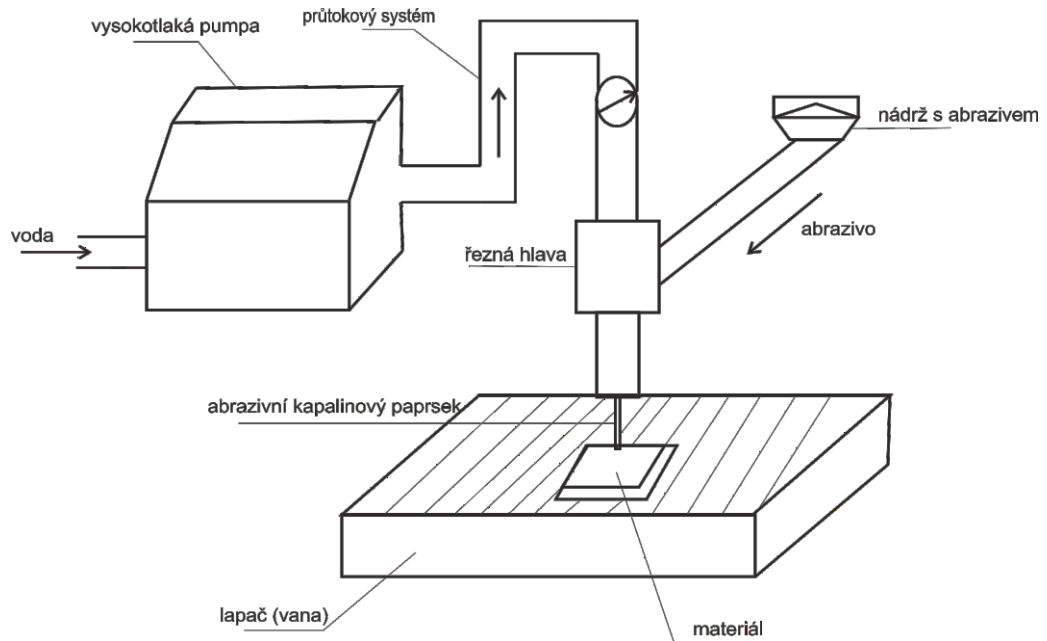
Obrázek 3 - Schéma čistého kapalinového paprsku (vlastní schéma - překresleno z [5])

### Obrábění za pomoci abrazivního kapalinového paprsku

Tento způsob obrábění se děje za pomoci paprsku, do kterého se přidává dávkovací hlavou suché abrazivo přímo do směšovací komory, kde se mísí s proudem vody. Abrazivní kapalinový paprsek lze užít pro řezání tvrdých a velmi tvrdých materiálů. Abrazivní materiály mohou být přírodní nebo syntetické. Kapalná suspenze (tj. voda a minerální abrazivo) se z usměrňovací trubice vytlačuje vysokotlakým čerpadlem velkou rychlostí směrem k obráběnému materiálu a vytváří se souvislý abrazivní kapalinový paprsek. Kapalná suspenze může dosahovat rychlosti  $700 \text{ až } 1200 \text{ m.s}^{-1}$ . [7, 3]

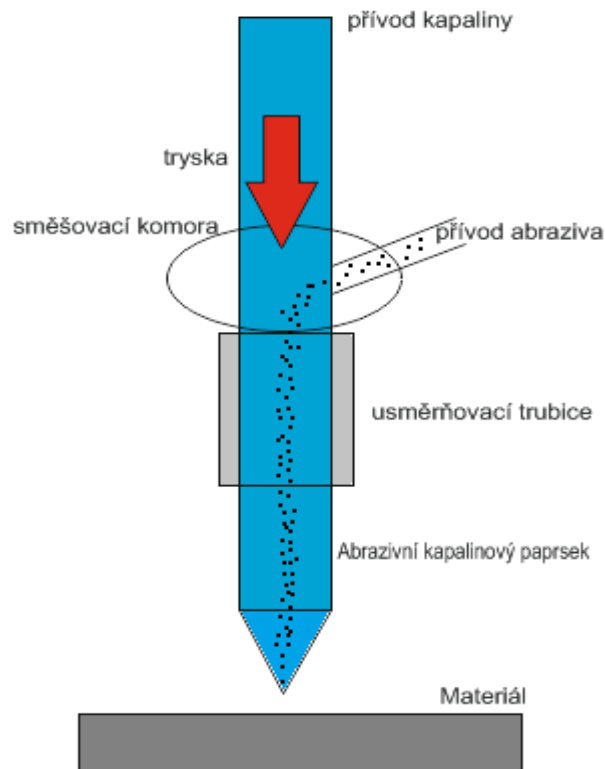
Po provedení řezu se řezaný materiál rozpadne na dvě části a malé mikroskopické částice. Směs vody, minerálního abraziva a částic obráběného materiálu se zachycují

v lapači (vaně), situované pod řezaným materiálem [9]. Abrazivní složka kalu, může být recyklována a navrácena zpět do obráběcího procesu. Recyklace abraziva dělá proces ekonomičtější a také šetrnější k životnímu prostředí. [10] Celý systém hydroabrazivního obrábění lze vidět na obrázku 4 a schéma abrazivního kapalinového paprsku na obrázku 5.



Obrázek 4 - systém hydroabrazivního zařízení (překresleno z [11])





Obrázek 5 - schéma kapalinového paprsku s abrazivem (vlastní schéma - překresleno z [3])

### 2.2.2 Technické parametry

Pro účinné řezání či obrábění kapalinovým paprskem jsou důležité dobře zvolené parametry procesu.

Technické parametry platné pro všechny kapalinové paprsky [6]

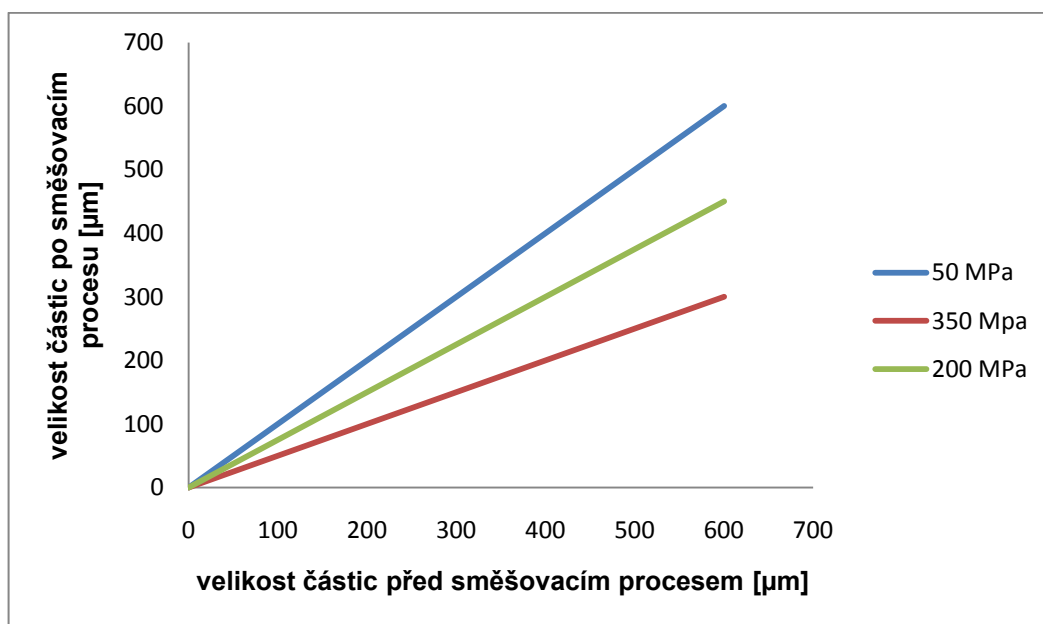
Účinnost kapalinového paprsku v praxi určují především dobře zvolené fyzikální veličiny.

- Průměr kapalinové trysky – v praxi jsou vyráběny trysky typických průměrů
- Vzdálenost výstupního ústí abrazivní trubice
- Tlak kapaliny před tryskou – tento parametr výrazně ovlivňuje výkon paprsku a dá se regulovat
- Rychlost posuvu paprsku – umožňuje regulaci hloubky porušení materiálu
- Úhel dopadu paprsku – změnou tohoto parametru lze upravovat kolmost stěn drážky při řezech

#### Technické parametry abrazivního kontinuálního paprsku [6]

Kromě výše uvedených parametrů existují i další specifické parametry pro abrazivní kapalinový paprsek, které ovlivňují kvalitu obrábění a čištění materiálu.

- Množství abraziva přidávaného do paprsku – tímto je možno regulovat hloubku destrukce materiálu a kvalitu jeho povrchu
- Zrnitost abrazivního materiálu – ovlivňuje kvalitu povrchu materiálu a hloubku jeho porušení, závislost zrnitosti a tlaku je zobrazeno v obrázku 6
- Průměr usměrňovací trubice – má velký vliv na kvalitu vytvořeného povrchu materiálu
- Délka usměrňovací trubice – ovlivňuje kvalitu povrchu materiálu
- Kvalita abraziva – ovlivňuje výkon paprsku a kvalitu povrchu materiálu



Obrázek 6 - Rozpad abrazivních zrn ve směšovací komoře abrazivním kapalinovým paprskem [6]

## 2.3 Magnetické vlastnosti látek

Magnetické pole vyvolává pohybující se elektrický náboj nebo změna elektrického pole, což vyplývá z jedné z Maxwellových rovnic. Pojem magnetismus lze použít pro magnetické jevy všeho druhu. Magnetismus je tedy určitý vědní obor, který vysvětluje magnetické děje. [12]

### 2.3.1 Přírodní a umělé magnety

Magnet je dočasně nebo permanentně magnetizované těleso, které vytváří magnetické pole především díky svým elektronům [12]. Prvním pověstným magnetem byl magnetovec [13]. Již počátkem n. l. Číňané používali magnetickou střelku jako kompas a Řekové věděli, že magnetovec přitahuje železné předměty. [12] Magnet má dva póly – severní (značí se písmenem „N“ - z angl. north) a jižní (značí se písmenem „S“ – z angl. south) a na těchto pólech se přitahují feromagnetika. Magnet působí silně přitažlivě na předměty, které jsou z feromagnetických látek - více o feromagnetismu viz kapitola 2.3.4. – feromagnetismus.

Magnety jsou buď přírodního, nebo umělého původu. Tzv. přírodní magnet se vyskytuje v přírodě, v zemské kůře. Přírodním magnetem je např. již zmíněný nerost magnetovec – chemický vzorec  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Magnetovec vzniká magmaticky nebo regionální metamorfózou, také kontaktní metamorfózou nebo ovlivněním magmatických plynů na uhličitánové horniny, které obsahují sulfidy a křemičitany. V praxi se daleko více používají tzv. umělé magnety. Umělé magnety se vyrábí z oceli nebo ze speciálních slitin, nejčastěji z feritů. [prezentace] Umělé magnetické pole lze také vytvořit pomocí cívky. [14]

Základní typy magnetismu, které rozeznáváme podle chování látek v magnetickém poli [13]:

1. Diamagnetismus
2. Paramagnetismus
3. Feromagnetismus
4. Ferimagnetismus
5. Antiferomagnetismus

### 2.3.2 Diamagnetismus

Diamagnetismus je jev, který mají všechny látky [13]. Tento děj je způsoben úsilím elektrických nábojů odstínit vnitřní prostor tělesa od vnějšího magnetického pole [15]. Je spojen s významem vnějšího magnetického pole intenzity  $H$  na látku [12]. V případě, že látka vykazuje také feromagnetismus nebo paramagnetismus, diamagnetismus je těmito vytlačen, jelikož je příliš slabý [13].

Látky, které se projevují diamagneticky, se nazývají diamagnetika a jsou magnetem slabě odpuzovány, jsou to látky magneticky nevodivé. Diamagnetické látky nelze magneticky separovat. Typickými diamagnetiky jsou vizmut, vápenec, křemen, galenit, tuha, baryt, atd. [12] Diamagnetické látky mají relativní permeabilitu menší než 1 ( $\mu_r < 1$ ) a velmi malou a zápornou susceptibilitu, kolem hodnot  $10^{-6} - 10^{-3}$ . [16, 17] Jev diamagnetismu je znázorněn na obrázku 7.

### 2.3.3 Paramagnetismus

Tento jev vykazují látky, které obsahují přechodové prvky, aktinidy a prvky vzácných zemin. Paramagnetismus je děj, který se vyznačuje specifickým uspořádáním magnetických momentů atomů (tzv. magnetický dipólový moment). Tyto magnetické momenty jsou v látce nahodile orientovány, a tak látka jako komplex nemá výsledné magnetické pole. Magnetický moment vykazuje tato látka až působením vnějšího magnetického pole. Toto vymizí poté, když vnější pole odstraníme. [12, 13]

Látky, které se projevují paramagneticky, nazýváme paramagnetika. Jsou to tedy takové látky, které se stávají magnetickými, jestliže jsou v magnetickém poli (př. siderit, zirkon, ilmenit atd.). Paramagnetika jsou složena z paramagnetických atomů a jejich permeabilita je větší než 1 ( $\mu_r > 1$ ). Paramagnetické materiály vykazují typickou susceptibilitu  $10^{-6} - 10^{-1}$  (sodík, draslík, modrá skalice, hliník, atd.). Dalšími typickými paramagnetickými látkami jsou volné radikály. V případě, že bude paramagnetikum v blízkosti magnetu, bude samo přitahovat malé kovové předměty (jako např. kancelářské svorky). Paramagnetickou látku není možné zmagnetovat trvale. Málokterý paramagnetický materiál má takovou susceptibilitu, aby mohl být používán k účinné magnetické separaci (vyjma železných rud a minerálů obsahujících železo). [12, 16, 17] Paramagnetickou křivku lze vidět na obrázku 8.

### 2.3.4 Feromagnetismus

Vlastnost např. niklu, železa, kobaltu, gadoliniu a dalších prvků (i slitin těchto a dalších např. i neferomagnetických prvků). Tento jev vykazují látky z důsledku kvantového děje, který nazýváme výměnná interakce mezi sousedními atomy. [13] Vlivem těchto sousedních atomů nastává souhlasná orientace magnetických polí. Při této

samovolné magnetizaci v látce vznikají tzv. magnetické domény s nahodilou orientací. Jestliže na magnetické domény začne působit vnější magnetické pole, začnou se orientovat souhlasně a látka získává vlastnosti magnetu. Při souhlasném uspořádání domén je látka magneticky nasycena a doménová struktura mizí. [16]

Látky, které se projevují feromagneticky, se nazývají feromagnetika. Schopnost magnetizace feromagnetické látky je proměnlivá a závisí na intenzitě magnetického pole. Feromagnetikum je látka se spontánním vnitřním magnetickým dipólovým momentem, což je nenulový magnetický moment v nulovém vnějším magnetickém poli [15]. Feromagnetika jsou složeny z paramagnetických atomů v takovém uspořádání, že dost výrazně zesilují magnetické pole a mají relativní permeabilitu o dost větší než 1 ( $\mu_r \gg 1$ ). Uspořádání atomů k zesílení magnetického pole u těchto látek lze vyvolat již slabým magnetickým polem a dojde k magnetování látky. Magnetické pole ve feromagnetiku zůstává, i když vnější pole zanikne. Feromagnetikum lze zmagnetovat natrvalo. Feromagnetická látka je utvořena stejným druhem atomů jako paramagnetikum, odlišuje se jiným uspořádáním atomů a v tom případě i jiným vzájemným silovým působením. [16] Relativní permeabilita se dostává až na hodnoty  $10^5$ . Feromagnetismus se projevuje pouze u látek v pevném skupenství nikoli u látek kapalných nebo plyných. U látek kapalných a plyných nemůže feromagnetismus vzniknout kvůli velké vzdálenosti atomů. Pro každé feromagnetikum existuje jednotlivá teplota, tzv. Curieova teplota  $T_c$  - při překročení této teploty (řádově stovky stupňů Celsia) materiál ztrácí feromagnetické vlastnosti a přejde z feromagnetické fáze do paramagnetické. [12] Vybrané parametry magnetizační křivky pro feromagnetika jsou zobrazeny v tabulce 1.

→ Dělení feromagnetik podle tvaru hysterezní smyčky [18]:

1. Magneticky měkká feromagnetika – tyto látky bývají většinou mechanicky měkké (např. měkké železo) a vyznačují se úzkou hysterezní smyčkou o malé ploše (viz obrázek 9), magneticky měkká feromagnetika mají velkou susceptibilitu
2. Magneticky tvrdá feromagnetika – tyto látky bývají většinou mechanicky tvrdé (např. tvrdá ocel) a vyznačují se širokou hysterezní smyčkou o velké ploše (viz obrázek 10), magneticky tvrdá feromagnetika mají malou susceptibilitu

### 2.3.5 Ferimagnetismus

Tento děj vykazují látky se spontánní vnitřní magnetickou polarizací bez přispění např. vnějšího magnetického pole. Látky, které se projevují ferimagneticky, se nazývají ferimagnetika. Ferimagnetikum je tvořeno doménami se specificky orientovanými magnetickými momenty. Ferimagnetické látky jsou silně magnetické a relativní permeabilita může dosahovat hodnot až  $10^3$ . [12] Mezi látky ferimagnetické řadíme tzv. ferity (sloučeniny  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  s oxidy jiných kovů). Ferimagnetika mají mnohem větší elektrický odpor než feromagnetika. Pro každé ferimagnetikum existuje tzv. Néelova teplota, při jejímž překročení přejde materiál z ferimagnetické fáze do paramagnetické. [12, 16]

### 2.3.6 Antiferomagnetismus

Původ antiferomagnetismu je podobný jako u feromagnetismu. Antiferomagnetismus vykazují látky se samovolnou vnitřní magnetickou polarizací. Tento děj vykazují látky, které nazýváme antiferomagnetika. Rozdíl antiferomagnetika od feromagnetika je v tom, že antiferomagnetikum je tvořeno soustavami atomů se stejně orientovanými magnetickými momenty, jejichž výsledné magnetické momenty jsou antiparalelní a výsledný magnetický moment antiferomagnetického materiálu je tedy nulový. Susceptibilita u těchto materiálů je velmi malá a pozitivní. Některá antiferomagnetika se mohou jevit jako slabá magnetika, protože mohou mít slabou magnetickou polarizaci jiného směru (např. hematit, karbonáty Fe, Mn atd.). Pro každé antiferomagnetikum existuje tzv. Néelova teplota, při jejímž překročení přejde materiál z antiferomagnetické fáze do paramagnetické. [12, 17]

### 2.3.7 Rozdělení látek podle velikosti měrné magnetické susceptibility [19]:

1. Silně magnetické – jejichž měrná magnetická susceptibilita dosahuje hodnot větších než  $3,8 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
2. Slabě magnetické – jejichž měrná susceptibilita je  $5 \cdot 10^{-6} - 1,26 \cdot 10^{-7} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ , spodní hranice susceptibility pro slabě magnetické látky se může ještě snížit s rostoucími magnetickými silami separace

3. Nemagnetické minerály – to jsou všechny diamagnetické látky a některé paramagnetické materiály, které mají měrnou magnetickou susceptibilitu  $< 1,26 \cdot 10^{-7} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

### 2.3.8 Základní magnetické veličiny a jejich jednotky

- Magnetická permeabilita:  $\mu = \mu_0 \mu_r [\text{H/m}]$
- Relativní permeabilita:  $\mu_r = 1 + \kappa$
- Intenzita magnetického pole:  $H [\text{A/m}]$
- Magnetická indukce:  $B = \mu H [\text{T}]$
- Magnetická indukce pro feromagnety:  $B = \mu(H+M) [\text{T}]$
- Magnetický moment:  $m [\text{A} \cdot \text{m}^2]$
- Magnetizace:  $M = \frac{m}{V} [\text{A/m}]$
- Susceptibilita:  $\kappa = \frac{dM}{dH} [-]$

#### Magnetická permeabilita

Magnetická permeabilita  $\mu$  udává vlastnosti prostředí [18].

#### Relativní permeabilita

Permeabilita  $\mu_r$ , která se nazývá relativní permeabilita, je bezrozměrná veličina, jež charakterizuje jednu ze základních vlastností hmoty – magnetickou vodivost. Konstanta  $\mu_0$  se nazývá permeabilita vakua. [18]

#### Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole  $H$  je vektorová fyzikální veličina, která udává velikost magnetického pole [12].

#### Magnetická indukce

Magnetická indukce  $B$  je veličina, která vyjadřuje silové působení magnetického pole na nosič elektrického náboje [12].

### Magnetický moment

Magnetický moment  $m$ , též Ampérův magnetický moment, je vektorová fyzikální veličina, která popisuje magnetický dipól [12].

### Magnetizace

Magnetizace  $M$  je vektorová veličina. Udává velikost zmagnetování látky. Nazývá se též magnetická polarizace. Je to jev, ve kterém se změní nebo projeví magnetický moment. [12, 13]

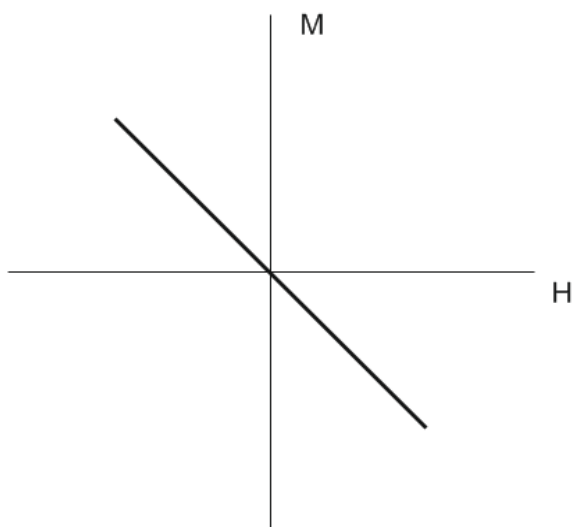
### Susceptibilita

Susceptibilita  $\kappa$  je veličina, která vyjadřuje schopnost materiálu „pojmout“ magnetismus [20].

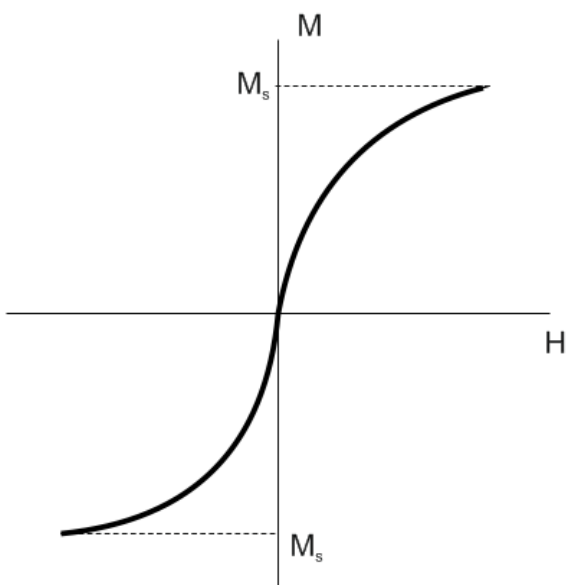
## **2.3.9 Magnetizační křivky**

Magnetizační křivky popisují magnetizační děj a znázorňují závislost magnetizace  $M$  na intenzitě magnetického pole  $H$ . Viz obrázek 7 zobrazuje magnetizační křivku pro diamagnetickou látku, obrázek 8 vyobrazuje křivku pro paramagnetickou látku a obr. 9 a 10 pro ferimagnetickou a feromagnetickou látku. Panenská křivka v obrázku 9 a 10 znázorňuje stav, kdy je materiál buďto dokonale odmagnetován anebo dosud nemagnetován. Takovýto stav se tedy nazývá panenský nebo nulový a křivka je proto pojmenována jako panenská magnetizační křivka, také křivka prvotní magnetizace. Veličina  $M_s$  v obr. 8, 9, 10 popisuje stav, kdy magnetizace fero- a feri - magnetik dospěje ke svému nasycení a nazývá se nasycená (saturační) magnetizace. Veličina  $M_r$  v obr. 9, 10 se nazývá remanence neboli zbytková magnetizace a udává stav, kdy si magnetizace podržuje určitou hodnotu. Projevuje se tehdy, klesne - li intenzita pole na nulu. [18]

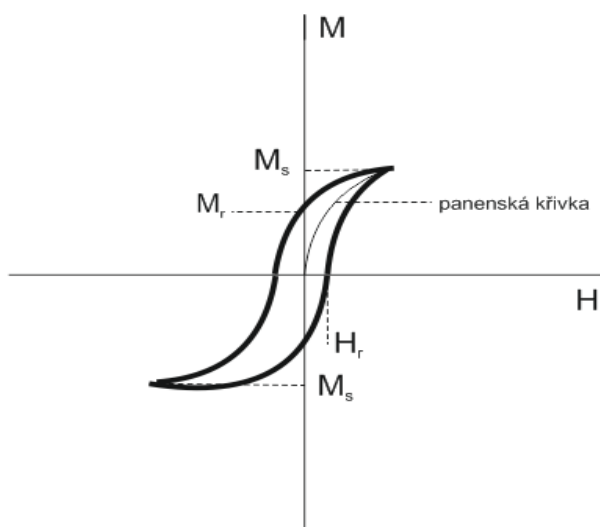




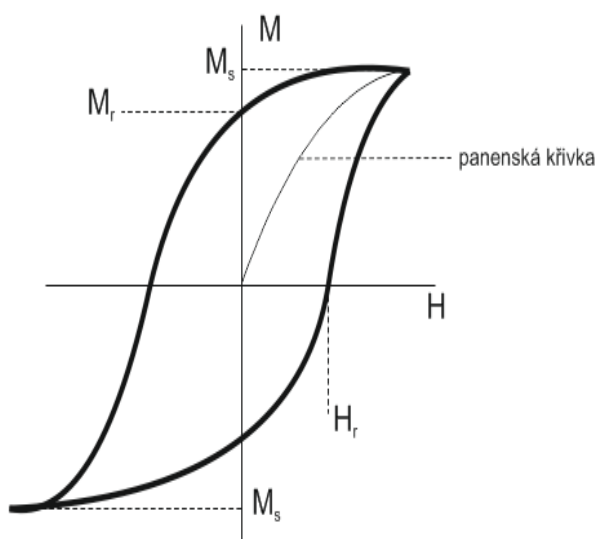
Obrázek 7 - magnetizační křivka pro diamagnet (překresleno z [13])



Obrázek 8 - magnetizační křivka pro paramagnet (překresleno podle [13])



Obrázek 9 - magnetizační křivka fero - a feri - magnetu (pro magneticky měkký materiál),  
tzv. hysterezní křivka (překresleno podle [13])



Obrázek 10 - magnetizační křivka fero - a feri - magnetu (pro magneticky tvrdý materiál),  
tzv. hysterezní křivka (překresleno podle [13])

$M$	magnetizace
$M_s$	saturační magnetizace (nasycená magnetizace)
$M_r$	zbytková magnetizace (remanence)
$H$	intenzita magnetického pole
$H_r$	zbytková intenzita magnetického pole

Tabulka 1 - vybrané parametry magnetizační křivky pro feromagnety [21]

	Fe	Ni	Co
<b>Nasycená magnetizace při 20°C (<math>M_s</math>) [A/m]</b>	$1710 \cdot 10^3$	$485 \cdot 10^3$	$1431 \cdot 10^3$
<b>Curieova teplota (<math>T_c</math>) [°C]</b>	770	358	1121
<b>Koercitivní pole (<math>H_r</math>) [A/m]</b>	30	1500 - 100	70 - 10
<b>Relativní permeabilita (<math>\mu_r</math>)</b>	5000	600	80 - 200
<b>Susceptibilita (<math>\kappa</math>) [-]</b>	3000	3000	3000

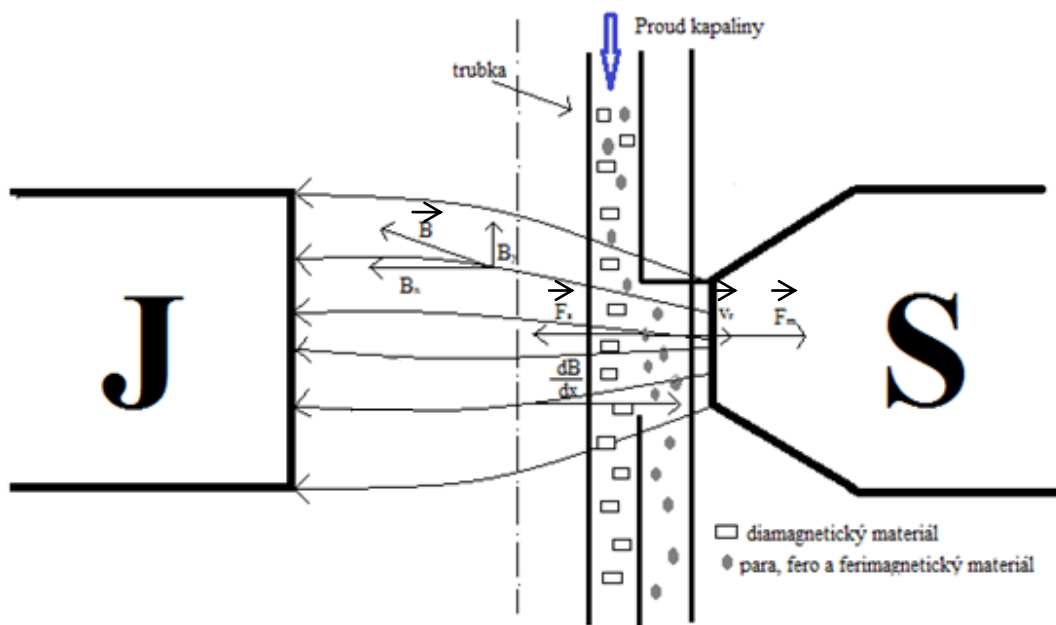
## 2.4 Magnetické separátory

Magnetická separace je založena na tom, že se v magnetickém poli produkt odseparuje na složku nemagnetickou a magnetickou. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3.1, magnetické látky jsou přitahovány magnetem, nemagnetické látky nikoli. Z tohoto vyplývá, že v magnetických rozdružovačích dochází k oddělování těchto dvou složek. [22] Magnetické separátory neboli magnetické rozdružovače využívají působení magnetické síly na částice [19]. Magnetické separátory mohou být tvořeny permanentními magnety nebo elektromagnety. Na účinnost rozdružování má vliv nejen intenzita magnetického pole, tvar a rozmístění magnetických pólů, ale i zrnitost materiálu. Účinnost rozdružování klesá se zmenšující se velikostí zrna. Princip magnetického rozdružování za mokra je

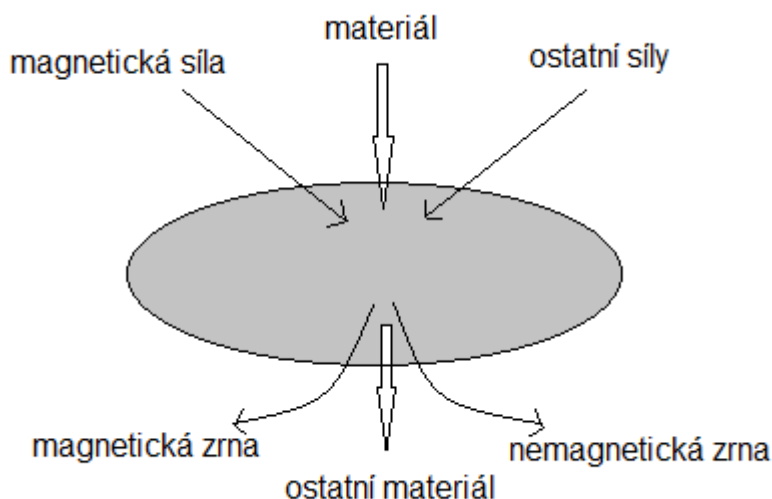
zobrazen na obrázku 11 a jednoduchý schematický diagram lze shlédnout na obr. 12. Mezi ostatní síly, které působí na zrna při magnetické separaci, lze zahrnout gravitační, setrvačnou, hydrodynamickou sílu a povrchové napětí částic. [20, 23, 24]

Firmy, které vyrábí v ČR magnetické separátory, jsou např.:

- JELÍNEK-TRADING spol. s r.o. – Společnost vznikla v roce 1991. Nyní firma patří k jednomu z největších zpracovatelů plastových tříděných odpadů v ČR. Mezi hlavní činnosti, kterými se firma zabývá, patří výroba a prodej odprašovacích zařízení a magnetických rozdružovačů. [25]
- MAGSY, s.r.o. – Společnost vyrábí a prodává magnetické separátory (např. magnetické separátory deskové, výsuvné, atd.) a magnetické materiály. [26]
- WAMAG, spol. s r.o. – Tato společnost byla založena v roce 1994. Nyní spolupracuje s nizozemskou firmou Goudsmit. Postupem času se vypracovala v oblasti výroby magnetických separátorů v ČR. [27]



Obrázek 11 - princip magnetické separace



Obrázek 12 – jednoduché schéma magnetického rozduřování (vlastní schéma – překresleno z [24])

Dělení magnetických separátorů podle intenzity magnetického pole [19, 20]:

1. Vysokointenzitní separátory – pro slabě magnetické látky, intenzita magnetického pole je od  $320 \cdot 10^3$  do  $1400 \cdot 10^3$  [A/m]. Pro konstrukci vysokointenzivních separátorů se používají uzavřené magnetické soustavy. Póly magnetů jsou umístěny proti sobě.
2. Nízkointenzitní separátory – pro silně magnetické látky, intenzita magnetického pole dosahuje hodnot do  $120 \cdot 10^3$  [A/m], vytvářejí malou intenzitu magnetického pole – bubnové, pásové a kotoučové separátory. Pro konstrukci nízkointenzitních separátorů se používají otevřené magnetické soustavy (radiální nebo lineární uspořádání pólů vedle sebe).

Dělení magnetických separátorů podle rozduřovacího prostředí [20]:

- suché magnetické separátory – na rozduřování za sucha má vliv působení elektrostatických sil (tření částic), kdy vznikají shluky, pro hrubě a středně zrnité suroviny
- mokré magnetické separátory – za mokra lze separovat jemně zrnité suroviny

Dělení separátorů podle způsobu přivádění materiálu [28]:

- deviační rozdružovač – materiál se přivádí do separátoru v jeho horní části nad magnetické pole, tj. shora. Působením magnetického pole dochází v magnetickém rozdružovači k vychýlení magnetických složek.
- extrakční rozdružovač – materiál se přivádí do rozdružovače zespod pod magnetické pole. Magnetické pole vytahuje magnetickou složku.

Dvě základní skupiny soustav magnetických separátorů [28]:

1. Otevřené magnetické soustavy - u kterých jsou konce magnetů položené v jedné rovině nebo válcové ploše a magnetické pole se vytváří působením řady pólů, které mají střídající se polaritu. Otevřená magnetická soustava se užívá pro bubnové, pásové, kotoučové separátory a pro separaci silně magnetických rud. Tato soustava vytváří magnetické pole docela nízké intenzity.
2. Uzavřené magnetické soustavy – u kterých jsou konce pólů proti sobě. Tyto póly vytváří magnetické pole. Uzavřená magnetická soustava se užívá na separaci slabě magnetických rud a produkuje magnetické pole vysoké intenzity.

#### **2.4.1 Vysokointenzitní magnetické separátory**

Vysokointenzitní magnetické separátory se používají pro slabě magnetické suroviny. Jsou to většinou uzavřené magnetické systémy, které jsou konstruované jak na suché rozdružování, tak na mokré rozdružování. Nejpoužívanějším typem vysokointenzitních magnetických rozdružovačů je pásový separátor Wetherill. Je konstruován tak, že se upravovaná surovina přivádí mezi póly elektromagnetů vodorovným pásem. Používá se k rozdružování jemnozrnných materiálů za sucha. [20]

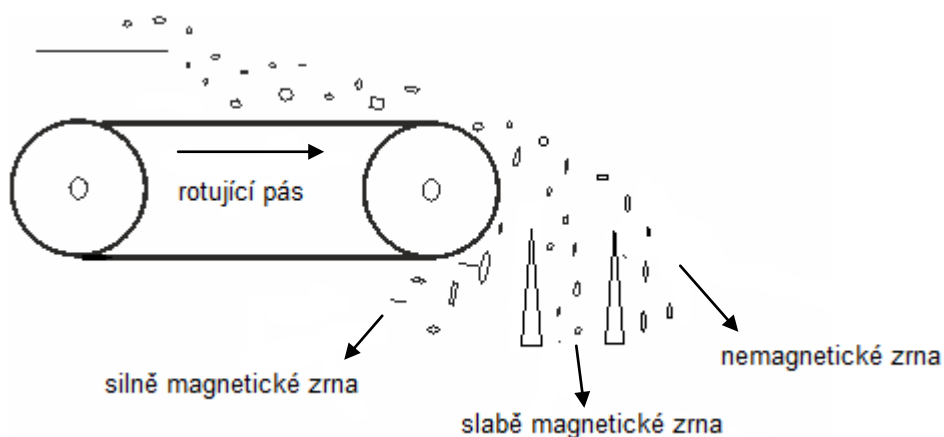
Dělení vysokointenzitních separátorů [28]:

1. Magnetické separátory vysokointenzitní suché
  - Válečkové - indukční extrakční separátory
  - Válečkové - indukční deviační separátory
  - Indukční - kotoučové extrakční separátory
  - Pásové - extrakční separátory (s příčnými pásy)

2. Magnetické separátory vysokointenzitní mokré
  - Indukční magnetický separátor s magnetickou indukcí do 1 tesla
3. Magnetické separátory s polygradientním polem

#### 1. Magnetické separátory vysokointenzitní suché

Aplikují se na slabě magnetické materiály o zrnitosti asi 0,1 – 6 mm. Jejich magnetické pole je uzavřené, skládá se z elektromagnetického systému s vysokým gradientem intenzity [28]. Do této skupiny rozdělovačů patří válečkový – indukční separátor se spodním přívodem nebo horním přívodem. Jedná se v podstatě o elektromagnet s otáčejícím se válečkem. Viz obrázek 13. Indukční váleček sestává z mosazných a ocelových kotoučků. Tak vzniká nehomogenní magnetické pole. Zrna, jež nejsou magnetická, odpadají do jímky po projití mezi indukčním válečkem a pólovým nástavcem a magnetická zrna jsou přitahována nebo vychylována indukčním válečkem a dále unášena nad jímku. [20]



Obrázek 13 - magnetický válečkový - deviační separátor s permanentními magnety (překresleno z [24])

#### Indukční - kotoučové extrakční separátory

Tento typ separátoru pracuje na principu, kdy je rozdělovaná surovina přiváděna dávkovacím zařízením a podávacím pásem zespod. Pod podávacím pásem je elektromagnet, kde se indukují magnetické póly. Zrna, která jsou magnetická, jsou přitahována vzhůru a jsou zadržena na hrotech otáčejícího se kotouče (zpravidla s větším

počtem kotoučů za sebou) a postupně odpadají po stranách separátoru. Nemagnetická zrna jsou unášena v původním směru pásem. Toto zařízení se užívá k separaci slabě magnetických rud. [22, 28]

#### Pásové – extrakční separátory (s příčnými pásy)

Tento typ rozdružovače patří dnes již k zastaralým zařízením. Surovina určená k rozdružování se přivádí ze zásobníku na podávací pás do separátoru. Magnetický systém je tvořen elektromagnety nebo cívkou. Jelikož je surovina vtahována do stále silnějšího magnetického pole, separují se z ní postupně magnetické částice. [28]

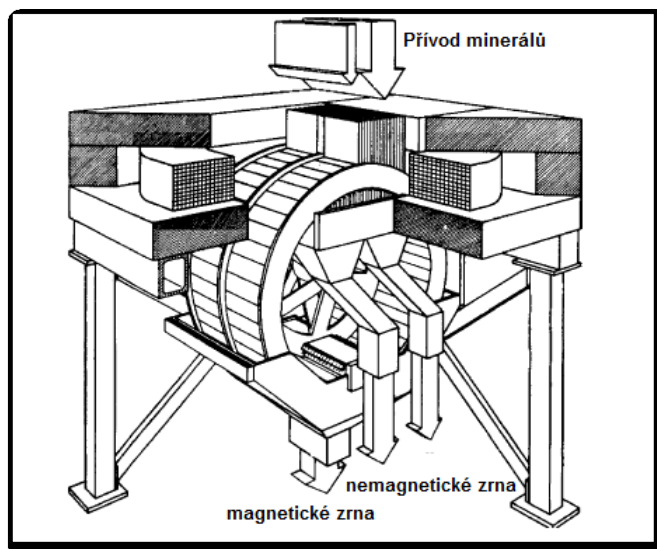
#### 2. Magnetické separátory vysokointenzitní mokré

Tento typ zařízení se používá pro slabě magnetickou surovinu, také pro surovinu v mokrému stavu, která by v případě použití jiného separátoru potřebovala usušit, a tento proces sušení by byl neekonomický. A dále pro surovinu v rozmezí velikosti od 0,1 – 5 mm. Nejpoužívanější separátor v praxi je indukční magnetický separátor s magnetickou indukcí do 1 Tesla. Jde o válečkový mokrá separátor. [25]

#### 3. Magnetické separátory s polygradientním magnetickým polem vysoké intenzity

Takzvaný HGMS rozdružovač (obrázek 14). Vysoké intenzity magnetického pole je dosahováno tak, že do rozdružovací plochy mezi póly silného elektromagnetu jsou položena tělíska z měkkého Fe. Vytvoří se silné magnetické pole s gradientem. [24]





Obrázek 14 - schéma separátoru HGMS (převzato z [24])

#### 2.4.2 Nízkointenzitní magnetické separátory

Typickým znakem těchto zařízení je otevřený systém magnetů s intenzitou magnetického pole do 130000 [A/m]. Z tohoto vyplývá, že magnetické póly leží vedle sebe. Používají se pro silně magnetické suroviny jak hrubozrnných, tak i jemnozrnných. Nejpoužívanějšími v praxi jsou bubnové separátory. Nízkointenzitní magnetický rozdělovač je znázorněn na obrázku 15. [20, 28]



Obrázek 15 - suchý nízkointenzitní magnetický separátor (překresleno z [24])

Dělení nízkointenzitních separátorů [28]:

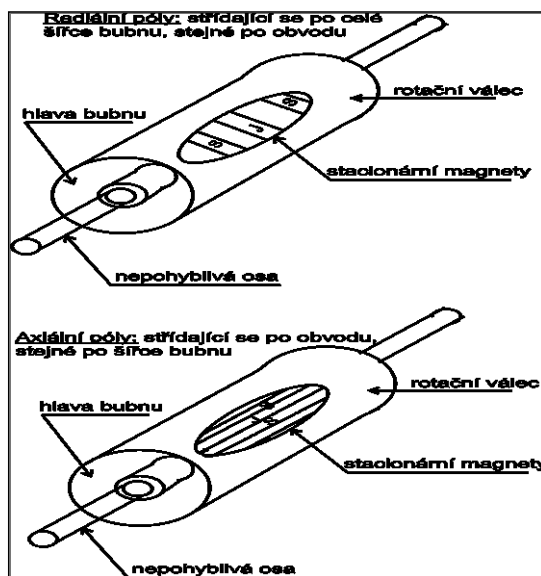
1. Magnetické separátory nízkointenzitní suché
  - Bubnové separátory
    - s axiálním uspořádáním magnetů (se sektorovými póly)
    - s radiálním uspořádáním magnetů (se střídavými póly)
2. Magnetické odlučovače železa
  - Pásové magnetické odlučovače Fe
  - Bubnové separátory s axiálním uspořádáním magnetů
3. Magnetické separátory nízkointenzitní mokré
  - Mokré pásové separátory
  - Mokré bubnové separátory
    - souproudé
    - protiproudé
    - poloprotiproudé

1. Magnetické separátory nízkointenzitní suché

Vyrábějí se jako rozdružovače bubnové s axiálním uspořádáním magnetů nebo s radiálním uspořádáním magnetů.

Bubnové mokré nízkointenzitní separátory

Konstrukce rozdružovače je tvořena hnacím bubnem a sektorovými (tj. umístěnými vedle sebe) nebo střídavými (tj. umístěnými za sebou) póly. Podle uspořádání pólů se bubnové separátory dělí na separátory s axiálním nebo radiálním uspořádáním magnetů. Pro lepší porozumění je rozmístění pólů zobrazeno na obrázku 16. Nemagnetická zrna odpadají od bubnu a padají nejkratší cestou z bubnu a magnetická jsou přitahována magnetem k povrchu bubnu, kde jsou unášena do poloviny bubnu, vzdalují se od magnetu a odtud padají do speciální jímky. [22, 28]



Obrázek 16 - uspořádání pólů v magnetických bubnových separátorech (překresleno podle [24])

## 2. Magnetické odlučovače železa

Tyto odlučovače slouží k odstranění Fe z těles. Uplatňuje se při separaci silně magnetických materiálů a je určen především k separaci hrubě zrnitých materiálů. Odlučovače železa se užívají při drcení v úpravnách, jako ochrana drtičů a třídičů, např. při vniknutí cizích železných předmětů. Do této skupiny zařízení lze zahrnout pásové magnetické odlučovače železa a bubnové separátory s axiálním uspořádáním magnetů. [20, 22, 28]

## 3. Magnetické separátory nízkointenzitní mokré

Tyto nízkointenzitní magnetické zařízení se uplatňují především pro separaci silně magnetických, jemnozrnných rud. Vyrábějí se ve dvojím provedení, a to jako pásové a bubnové separátory. Bubnové separátory bývají většinou konstruovány jako extrakční separátory s bubnem, který je z části ponořen do suspenze. Magnetická zrna jsou přitahována vlivem přitažlivé síly na povrch bubnu a vynášena směrem vzhůru, kde odpadají od bubnu a tvoří magnetický koncentrát. Zrna, jež nejsou magnetická, zůstávají v suspenzi a jsou vynášena jako odpad. Používají se k separaci především magnetitu. Podle přivádění a vynášení materiálu se dělí na souproudé (vynášení magnetického i nemagnetického materiálu se děje ve směru otáčení bubnu), protiproudé (magnetický

materiál je vynášen „proti proudu“ přívodu) a poloprotiproudé (magnetický materiál je vynášen ve směru otáčení bubnu a nemagnetický materiál protiproudě). [20, 28]

### 3. Praktická část

Praktická část diplomové práce je zaměřena na modelový popis separace a celé recyklace vybraných minerálních práškových abrazivních materiálů.

#### 3.1 Materiál a metody práce (odběr vzorků, popis postupu práce)

První metodou postupu práce byla příprava vzorků abrazivních materiálů, další měření magnetických vlastností abraziva. Poté se počítaly magnetické vlastnosti abraziv a jejich radiální rychlost separace. Podrobněji o materiálu a postupu práce viz kapitola 3.1.1 a 3.1.2.

##### 3.1.1 Materiál

V rámci této diplomové práce se při zkoumání magnetických vlastností jednotlivých abraziv pracovalo celkem se čtyřmi práškovými minerály. Magnetické vlastnosti byly měřeny u almandinu, který je běžně používán jako abrazivo (např. Ústav geoniky, v. v. i. v Ostravě - Porubě používá tento minerál jako abrazivní materiál pro řezání kapalinovým paprskem), zirkonu, olivínu a chromitu.

V následující tabulce 2 můžeme vidět parametry použitých práškových abrazivních materiálů:

Tabulka 2 - Technické parametry abraziva [3, 9, 28, 29, 30, 31, dodací listy k zakoupenému materiálu – VŠB - TUO]

	<b>Almandin</b>	<b>Chromit</b>	<b>Olivín</b>	<b>Zirkon</b>
<b>Skupina</b>	Silikáty	Oxidy	Silikáty	Silikáty
<b>Původ</b>	Austrálie	JAR	Norsko	JAR
<b>Obchodní název</b>	Australský granát	Chromitový písek	Olivínový písek	Zirkonový písek
<b>Chem. složení</b>	$\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$	$\text{ZrSiO}_4$
<b>Soustava</b>	Kubická	Kubická	Rombická	Tetragonální
<b>Tvrdost (podle Mohse)</b>	6, 5 – 7,5	5,5	7	7,5
<b>Štěpnost</b>	Žádná	Žádná	Nedokonalá	Nedokonalá

<b>Hustota</b> ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) $\text{g} \cdot \text{m}^3$	4100 - 4300	4500 - 4800	3300 - 4300	4600 - 4700
<b>Lom</b>	Nerovný až lasturnatý	Nerovný	Lasturnatý	Nerovný až lasturnatý
<b>Dodavatel</b>	PTV spol. s r.o., Praha	FORMSERVIS, spol. s r.o., Brno	FORMSERVIS, spol. s r.o., Brno	FORMSERVIS, spol. s r.o., Brno
<b>Mineralogická čistota (%)</b>	97	97	>99,5	94 - 98
<b>Velikost částic</b> ( $\mu\text{m}$ )	120 - 730	120 - 1000	30 - 1100	60 - 300
<b>Susceptibilita</b> (SI)	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$(3 \text{ až } 120) \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$(-10 \text{ až } 43) \cdot 10^6$
<b>Magnetismus</b>	Ferimagnetický	Paramagnetický	Paramagnetický	Diamagnetický až paramagnetický

#### Výpočet spotřebovaného abraziva v praxi:

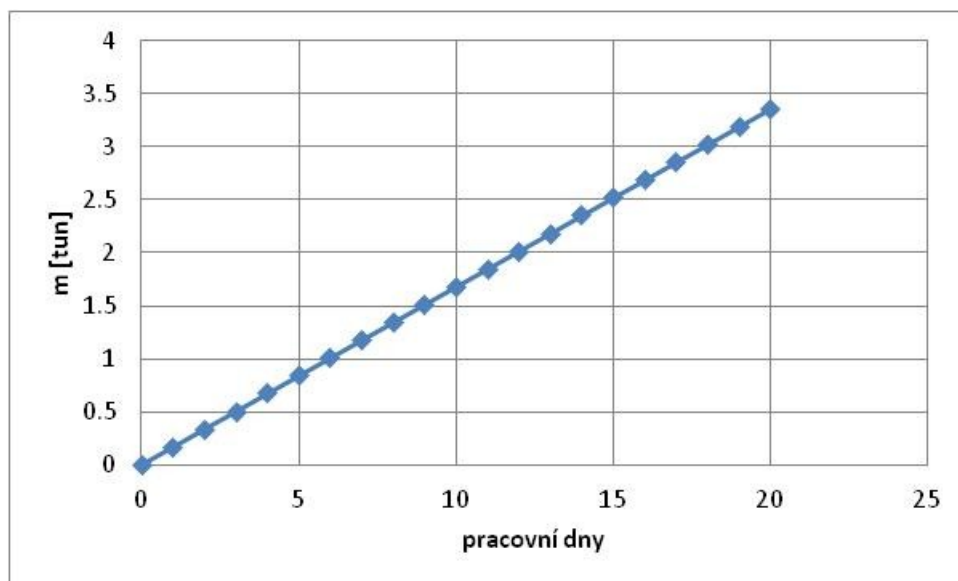
Osobní sdělení pana Mgr. Petra Jandačky, Ph.D.:

Do typického abrazivního kapalinového paprsku, který se používá pro provozní dělení menších kusů materiálů - délkový rozměr menší než 1 m) se přidává 350 g abraziva za minutu. Za předpokladu, že zařízení bude pracovat  $H = 8$  hodin denně,  $D = 20$  pracovních dní, spotřebuje se při tomto provozu abrazivo podle vzorce:

$$m = 350 \cdot H = 168000 \text{ g/den} = 168 \text{ kg/den spotřebovaného abraziva}$$

Za měsíc to bude:

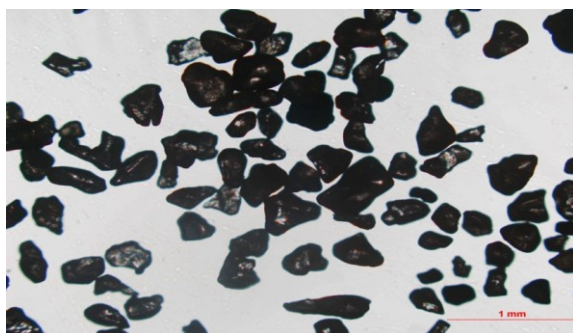
$$m = 168 \cdot D = 168 \cdot 20 = 3360 \text{ kg/20 dní} = \underline{\underline{3,36 \text{ t/ 20 dní}}} \text{ (znázorněno na obrázku 17)}$$



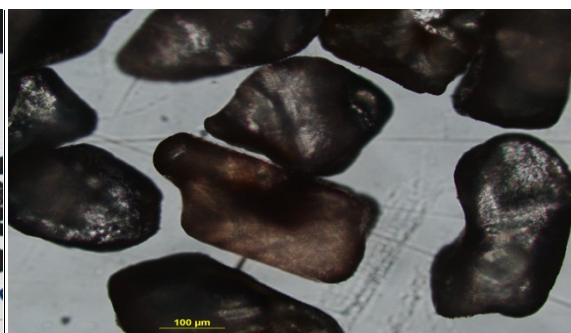
Obrázek 17 - graf spotřebovaného abraziva za 20 dní

### Mikroskopická analýza abraziva

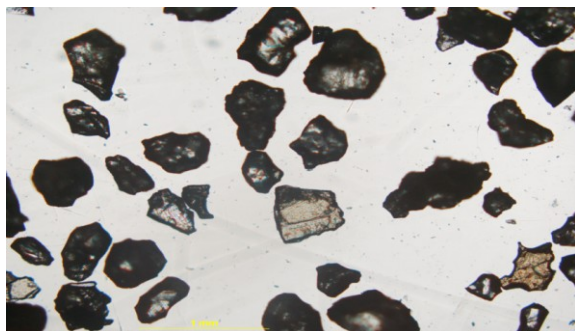
Mikroskopii lze použít především pro tvarovou a velikostní analýzu studovaných materiálů - abraziv. Na obrázku 18 až 24 jsou fotografie abraziv almandinu, olivínu, chromitu a zirkonu z mikroskopu. Zrna chromitu a zirkonu jsou kulatější než zrna almandinu a olivínu. Závislost velikosti zrn [ $\mu\text{m}$ ] na počtu zrn [%] je zobrazena v obrázku 25. Velikost částic se obvykle řídí log-normálním rozdělením [3].



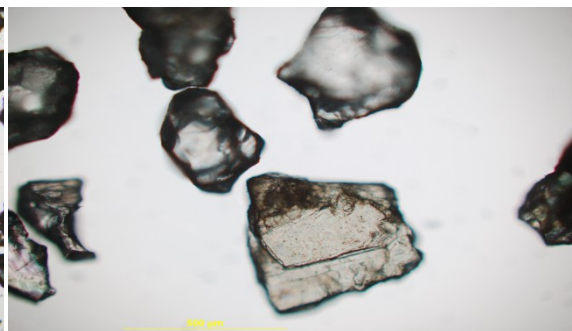
Obrázek 18 - almandin



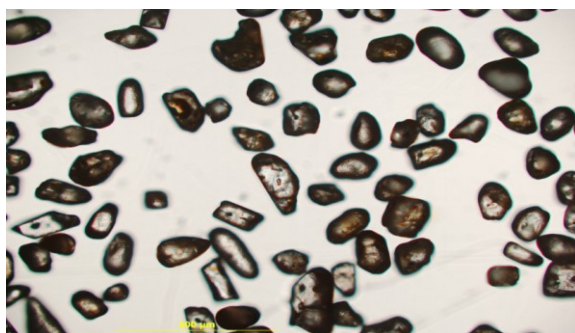
Obrázek 19 - almandin



Obrázek 20 – olivín



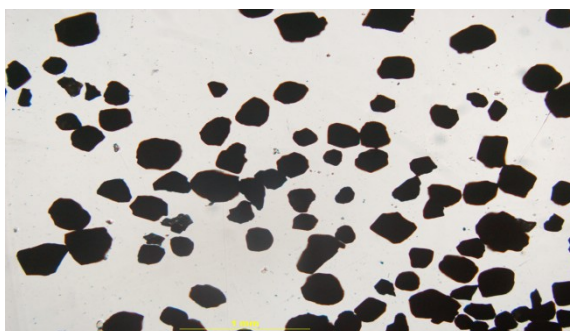
Obrázek 21 - olivín



Obrázek 22 - zirkon

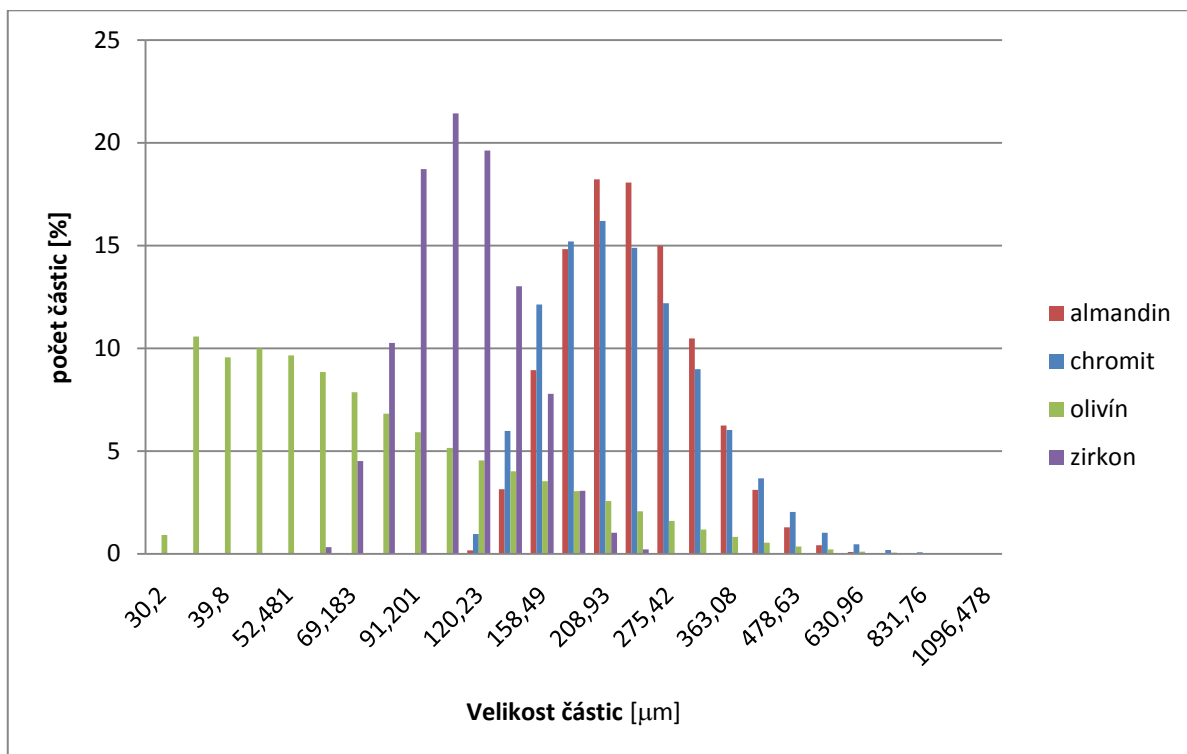


Obrázek 23 - zirkon



Obrázek 24 - chromit





Obrázek 25 - Zrnitostní křivky sledovaných abraziv

### 3.1.2 Metody práce

Metody práce byly jak experimentální tak teoretické. Experimentální činnost zahrnovala měření magnetických vlastností zkoumaných materiálů. V rámci teoretické činnosti byly v první fázi vyhodnocovány susceptibility těchto materiálů. V druhé, hlavní fázi, pak bylo modelováno chování abrazivních zrn v jednoduché konstrukci magnetického separátoru.

Výše zmíněné vzorky (viz kapitola 3.1.1) almandinu, chromitu, olivínu a zirkonu byly naplněny do kyvety a jednotlivě měřeny na přístroji zvaném vibrační magnetometr (z angl. vibrating sample magnetometer – zkratka EV9 VSM), známý též pod názvem ADE technologie. Na tomto vibračním magnetometru lze prakticky charakterizovat jakýkoli typ magnetického materiálu. Např. pevné látky, prášky, kapaliny, atd. Tímto VSM přístrojem (magnetometrem) byly naměřeny také celé magnetizační křivky studovaných materiálů.

Následoval teoretický popis chování těchto použitých práškových materiálů v magnetickém separátoru při modelových parametrech. Všechny částice (minerální zrna) byly aproximovány tvarem koule. Pro nejrůznější výpočty byl v diplomové práci využit software Microsoft Excel.

### 3.2 Výsledky

V rámci kapitoly výsledky jsou zobrazeny magnetizační křivky zkoumaných abrazivních práškových materiálů. Další podkapitola se zaměřuje na určení susceptibility těchto abraziv, poté je popsáno modelové chování studovaných materiálů v jednoduché konstrukci magnetického rozdělovače, kvalitativní popis separace směsi materiálů s návrhem možného procesu rozdělování a poslední podkapitolu zaujímá v práci závěr.

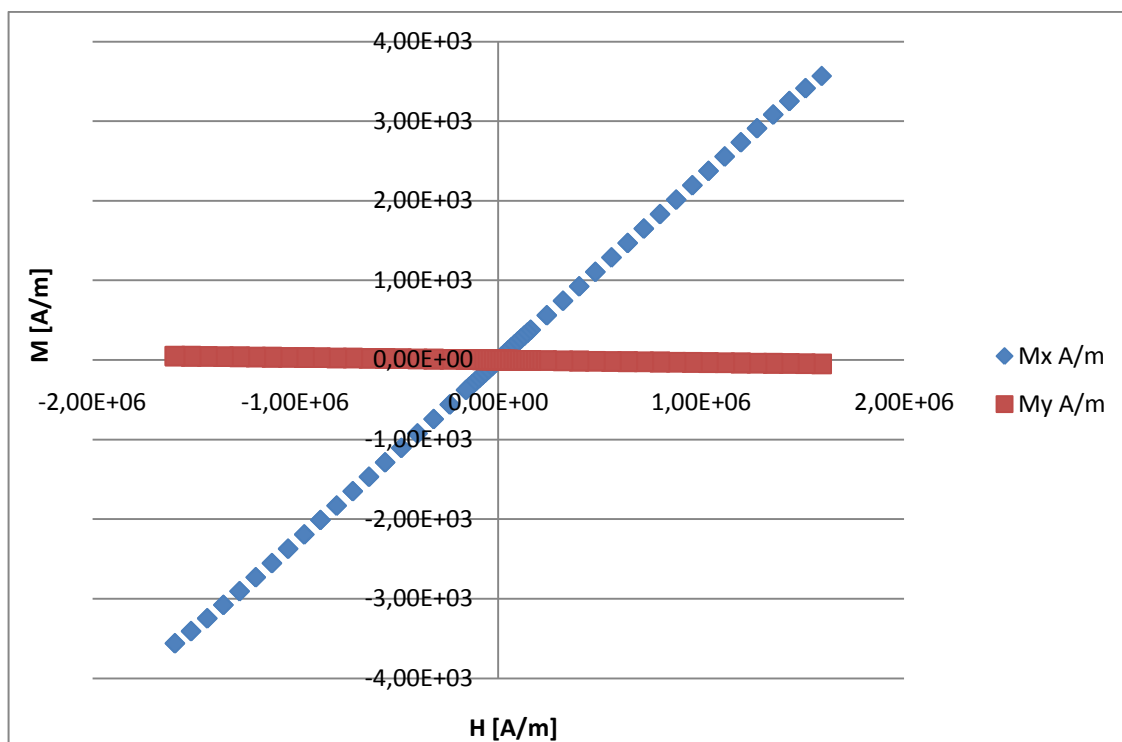
#### 3.2.1 Magnetizační křivky

První část výsledků znázorňují magnetizační křivky. Ty udávají magnetizaci studovaných materiálů (konkrétně veličiny  $M$  a  $H$  pro zkoumané materiály), přičemž byly při měření tyto materiály umístěny v kyvetě válcového tvaru o objemu  $70,65 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ . Jelikož je studovaný materiál v práškovém stavu, tak byl jeho objem aproximován výrazem  $0,65 \cdot V$ . Veličina  $V$  zde charakterizuje objem kyvety. Z tohoto vyplývá, že 65% prostoru v kyvetě je materiál a 35% je vzduch. Tento koeficient byl volen proto, jelikož nejtěsnější uspořádání tuhých koulí je takové, že tyto koule zabírají 74% prostoru. V tabulce 3 vidíme hmotnosti studovaných materiálů.

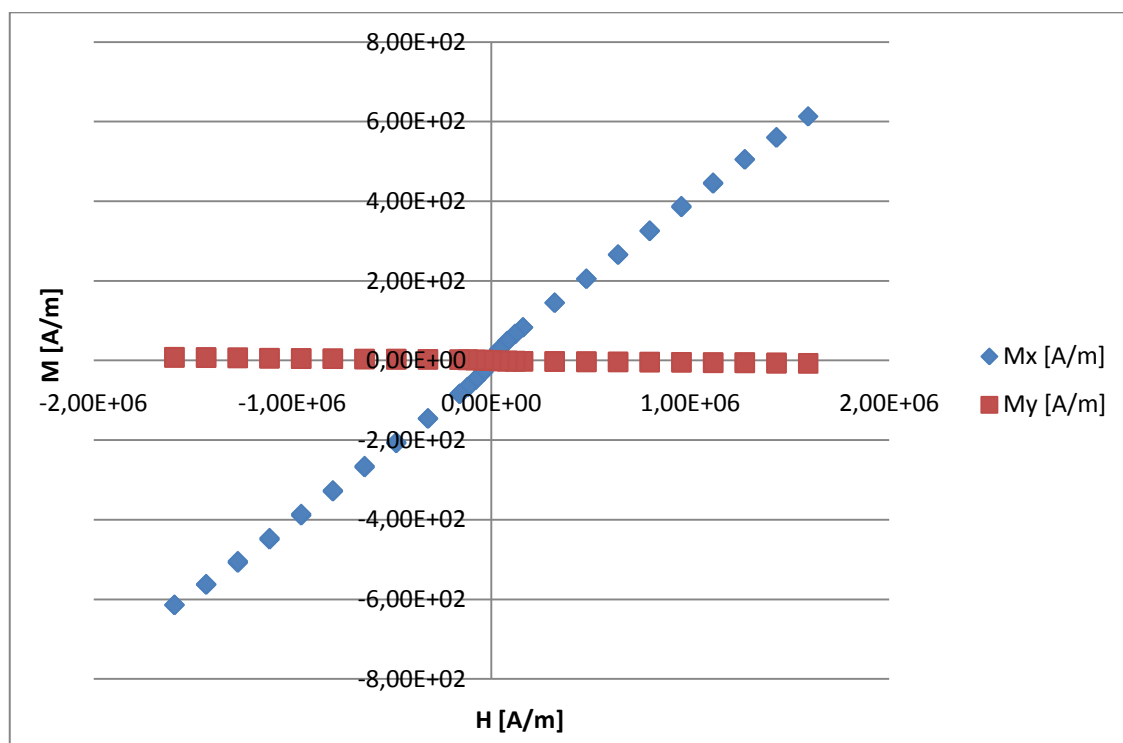
Tabulka 3 - hmotnost zkoumaných abraziv

	Almandin	Zirkon	Chromit	Olivín
Hmotnost vzorku s kyvetou [g]	0,314	0,348	0,346	0,273
Hmotnost vzorku bez kyvety [g]	0,168	0,201	0,198	0,125

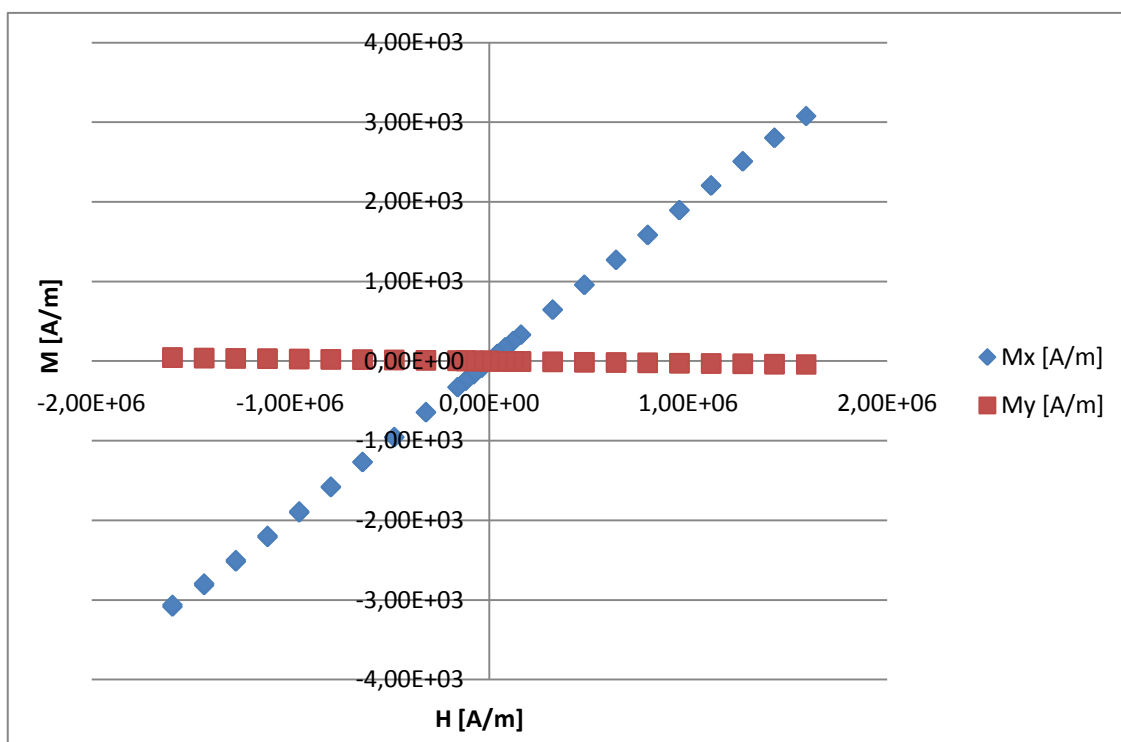
Jednotlivé magnetizační křivky studovaných vzorků almandinu, olivínu, chromitu a zirkonu jsou znázorněny na obr. 26, 27, 28 a 29. Odtud lze pozorovat magnetizaci těchto materiálů. Pro porovnání výsledků byl vykreslen obrázek 30.



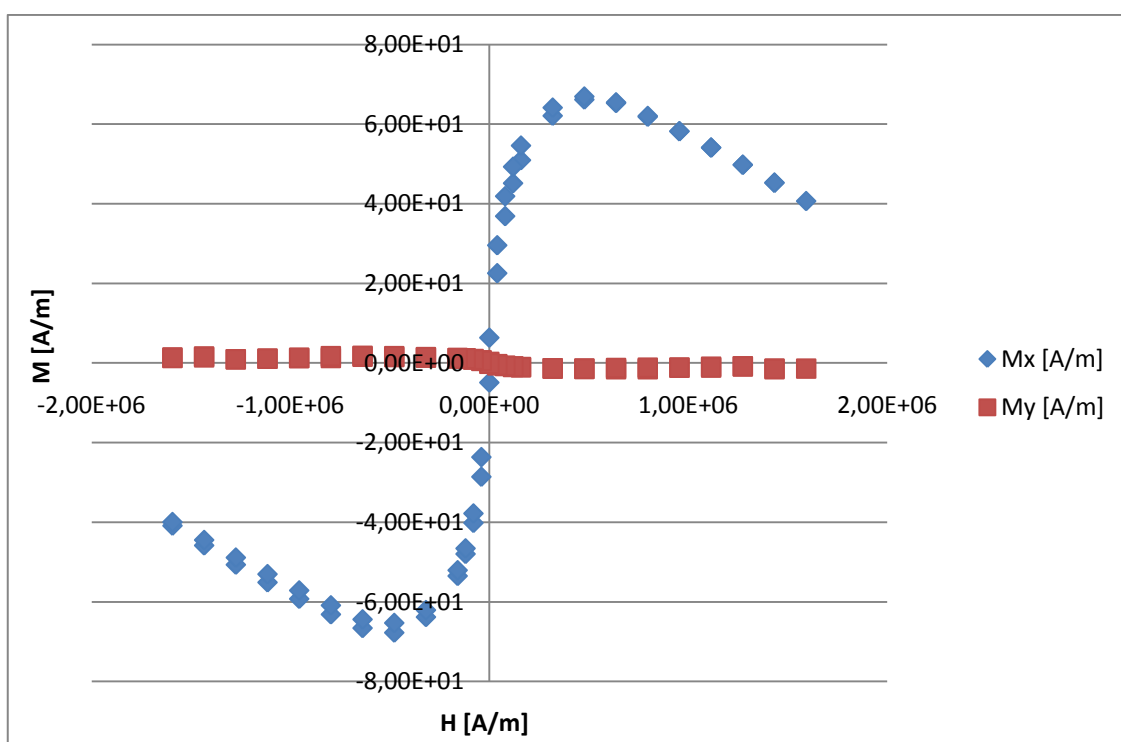
Obrázek 26 - magnetizační křivka almandinu



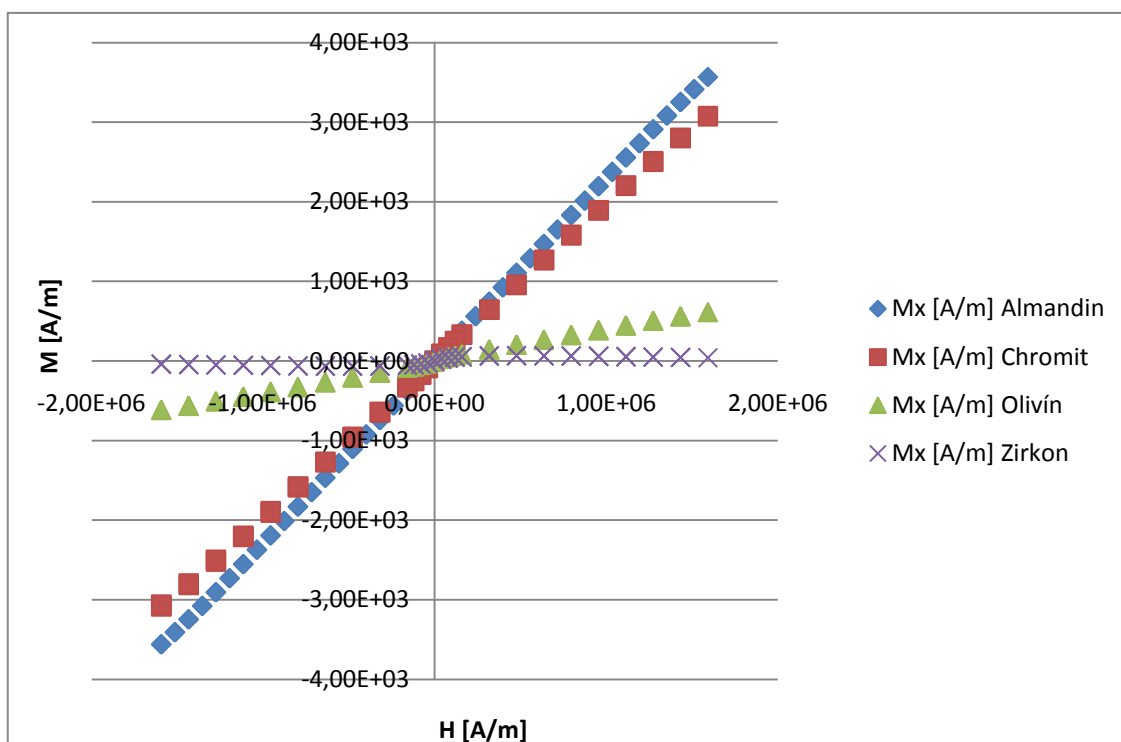
Obrázek 27 - magnetizační křivka pro olivín



Obrázek 28 - magnetizační křivka pro chromit



Obrázek 29 - magnetizační křivka zirkonu

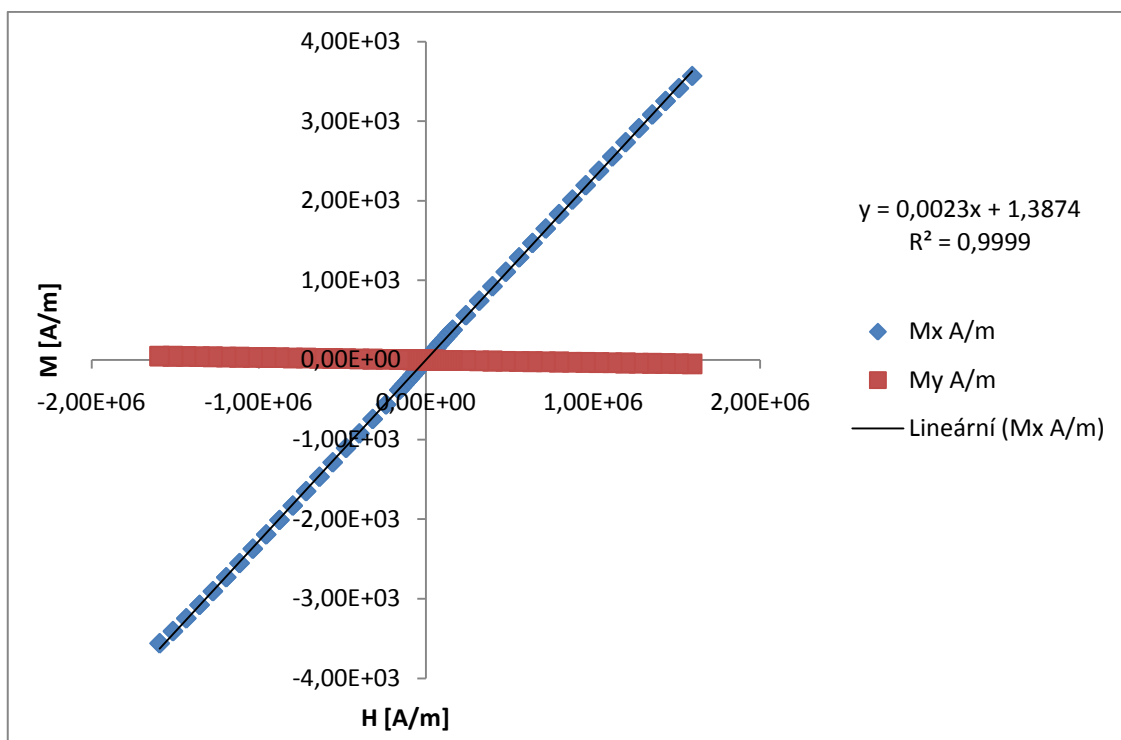


Obrázek 30 - magnetizační křivky všech měřených abrazivních materiálů

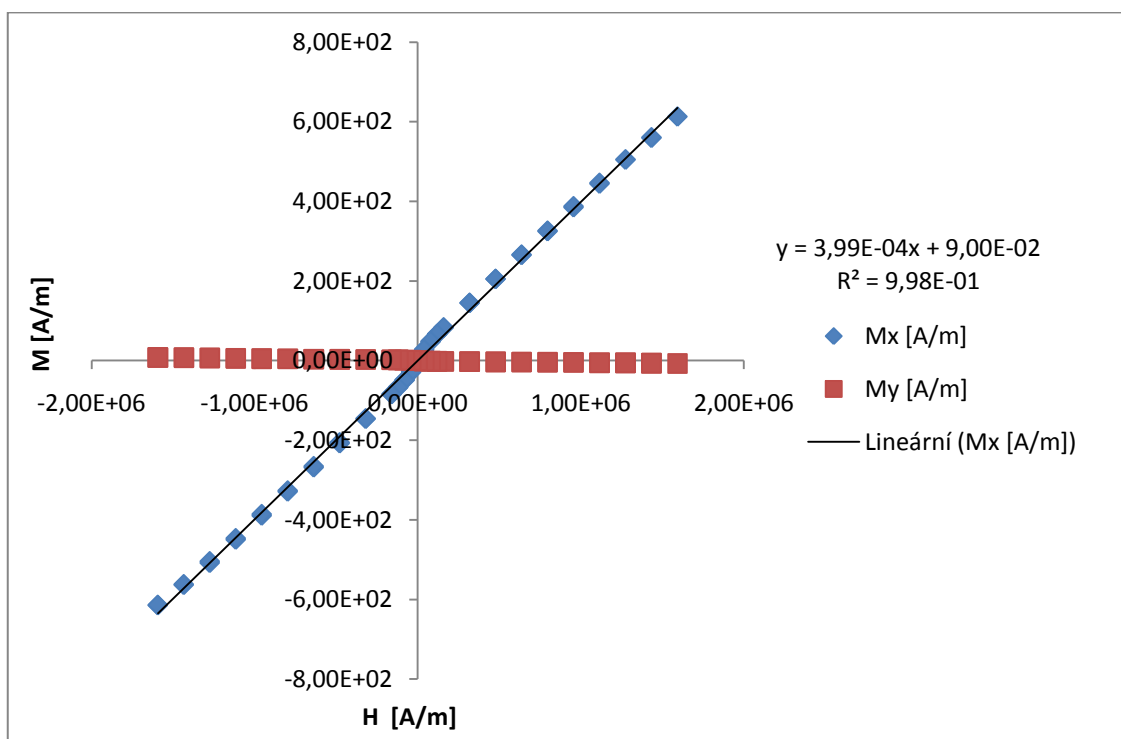
Na obrázku 29, 30 lze pozorovat diamagnetismus studovaného materiálu zirkonu, jehož hodnota susceptibility je v určité části magnetizační křivky záporná (v této části je diamagnetismus diamagnetické složky silnější než para - nebo fero - magnetismus příměsí). Z této příčiny již nebude tento minerál v praktické části diplomové práce nadále uváděn.

### 3.2.2 Určení susceptibility

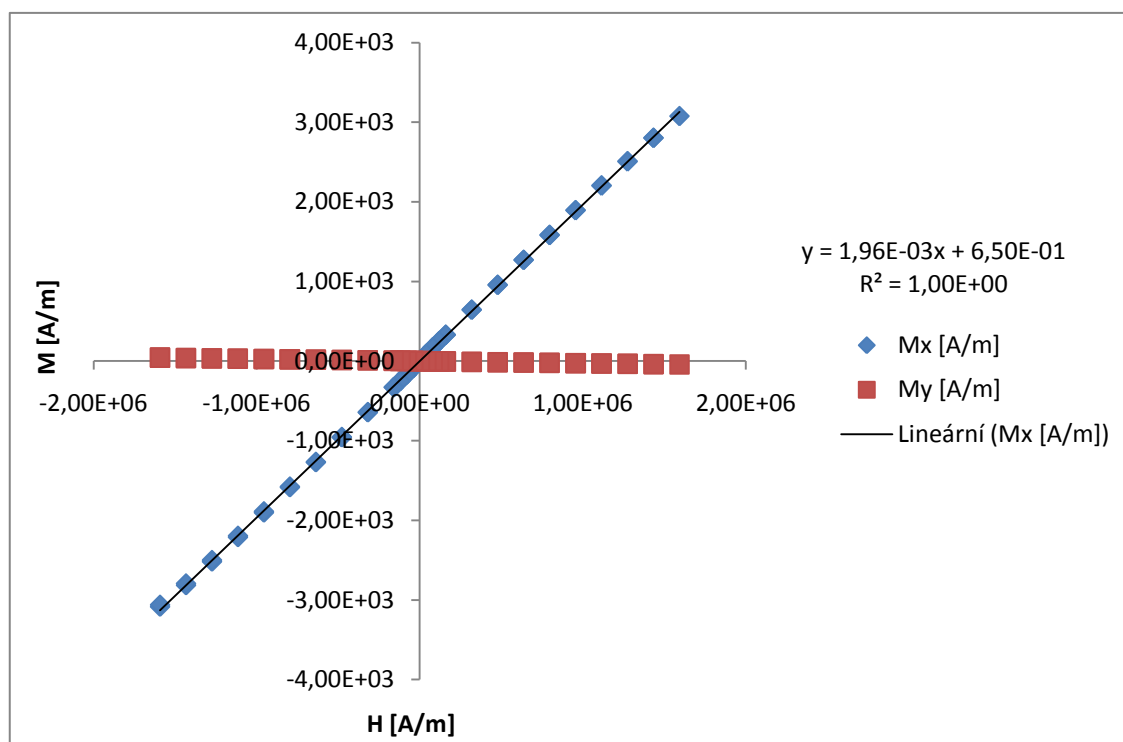
Magnetická susceptibilita je aktuální sklon magnetické křivky v nějakém bodě (směrnice). Pro magnetické rozdělování je důležitá složka  $M_x$ . Proložení experimentálních dat křivkou (tzv. fit) je znázorněno na obrázku 31, 32, 33.



Obrázek 31 - proložení experimentálních dat přímkou pro almandin (parametr  $R^2$  vyjadřuje spolehlivost teoretického proložení naměřených dat)



Obrázek 32 - proložení experimentálních dat přímkou pro olivín (parametr  $R^2$  vyjadřuje spolehlivost teoretického proložení naměřených dat)



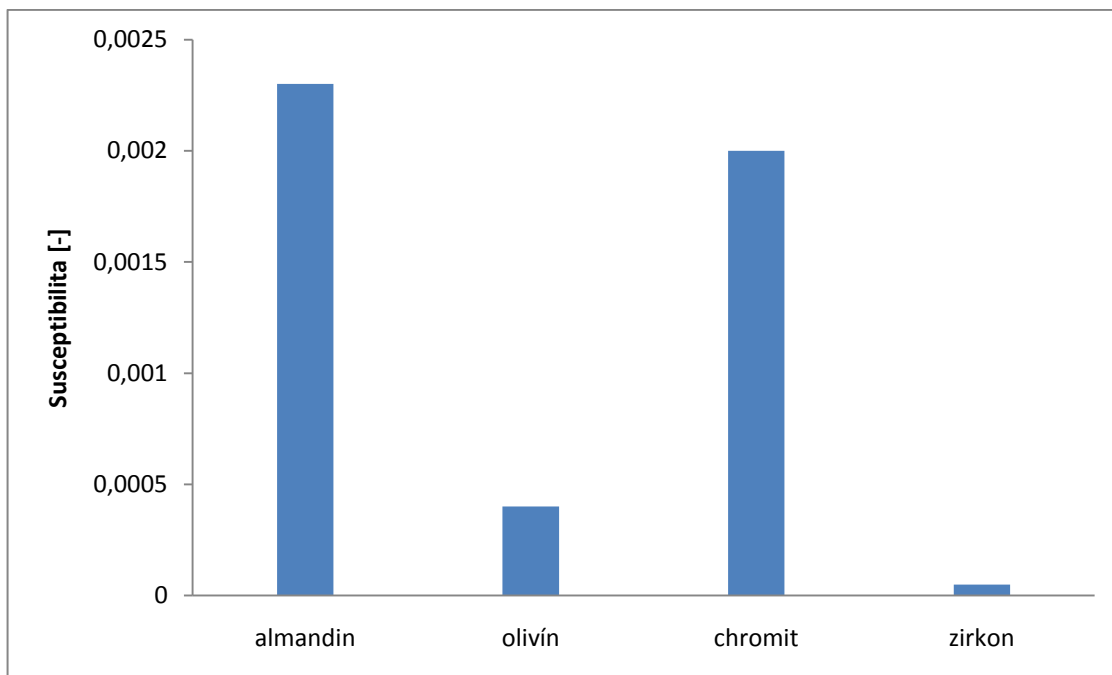
Obrázek 33 - proložení experimentálních dat přímkou pro chromit (parametr  $R^2$  vyjadřuje spolehlivost teoretického proložení naměřených dat)

Výpočet magnetické susceptibility:

$$\kappa = \frac{dM}{dH} \quad (1)$$

Tabulka 4 - Hodnoty susceptibility u studovaných abraziv

Zkoumaný materiál	Hodnoty susceptibility [-]
Almandin	0,0023
Olivín	0,0004
Chromit	0,002
Zirkon	0,00005



Obrázek 34 - Susceptibilita u zkoumaného abraziva

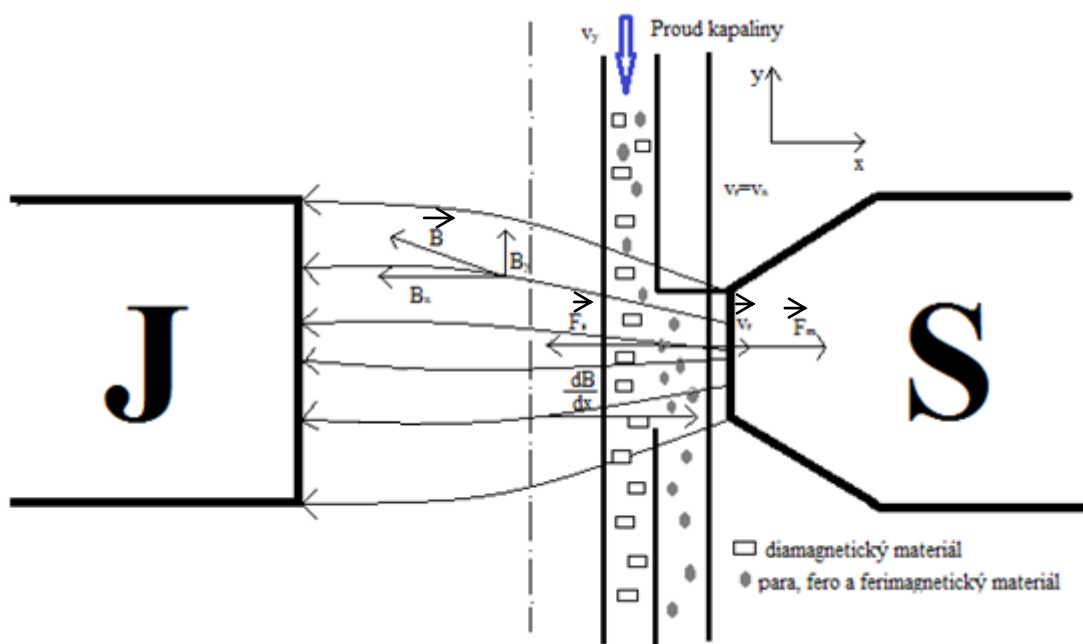
Z tabulky 4 a obrázku 34 je patrné, že almandin a chromit obsahují silně magnetické částice, vzorek olivínu obsahuje slabě magnetická zrna a minerál zirkon je zcela nemagnetický.

### 3.2.1 Popis modelového chování studovaných materiálů v jednoduché konstrukci magnetickém separátoru

Tato kapitola práce je zaměřena na určení radiální rychlosti částic (zrn) studovaných látek v magnetickém separátoru. Z fyzikálního hlediska jde o velice složitý problém, a proto je potřeba použít určitých zjednodušení. Teoretické úvahy budou vycházet z pohybové rovnice posuvného pohybu pro radiální směr, pro kterou platí  $\sum_{i=1}^n F = ma_r = m \frac{dv_r}{dt}$ , kde  $a_r$  je radiální zrychlení.

Princip magnetické separace je znázorněn na obrázku 35.





Obrázek 35 - Princip magnetického rozdělování

J	jižní pól magnetu
S	severní pól magnetu
$v_y$	axiální proud
$v_r$	radiální rychlost
$\frac{dB}{dx}$	gradient (změna veličiny v daném směru)
$\vec{B}$	magnetická indukce

### Magnetická a Stokesova síla

V rámci modelového výpočtu je počítáno s magnetickou a Stokesovou silou, takže pohybová rovnice má tvar:

$$F_m + F_s = m \frac{dv_r}{dt}, \quad (2)$$

kde  $F_m$  je magnetická síla a  $F_s$  je Stokesova síla.

Protože lze předpokládat, že v silně viskózním prostředí (např. voda) dojde k okamžitému vyrovnání magnetické a viskózní síly, můžeme považovat člen  $m \frac{dv_r}{dt}$  za nulový ( $m \frac{dv_r}{dt} = 0$ ) a zjednodušit silovou rovnici na tvar  $F_m = (-)F_s$ . Pro magnetickou sílu platí:

$$F_m = \frac{\kappa}{\mu_0} V B_x \frac{dB}{dx} \quad (3)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] je permeabilita vakua,  $V$  objem částice,  $B_x$  vnější magnetická indukce a  $dB/dx$  gradient magnetického pole, který určuje směr působící síly a tedy i radiální rychlosti  $v_r$ .

$$F_s = -3\pi\eta d v_r \quad (4)$$

kde  $\eta$  je viskozita vody (kapaliny),  $d$  velikost částic (zrn) a veličina  $v_r$  je označení pro radiální rychlost.

#### Odvození radiální rychlosti:

Jestliže víme, že

$$-F_s = F_m \quad (5)$$

z toho vyplývá:

$$3\pi\eta d v_r = \frac{\kappa}{\mu_0} V B_x \frac{dB}{dx} \quad (6)$$

kde směr magnetické síly udává směr gradientu  $B$ . A dále odvozujeme:

$$v_r = \frac{\kappa V B_x \frac{dB}{dx}}{3\pi\eta\mu_0 d} \quad (7)$$

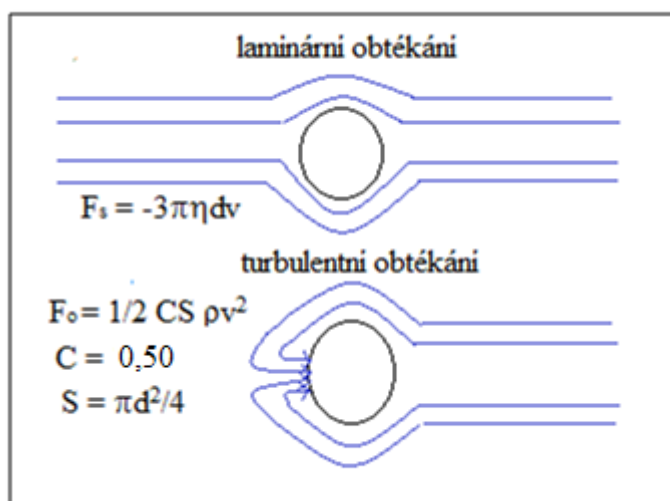
$$v_r = \frac{\frac{1}{6}\pi d^3 B_x \frac{dB}{dx}}{3\pi\eta\mu_0} \quad (8)$$

$$\boxed{v_r = \frac{\kappa d^2 B_x \frac{dB}{dx}}{18\eta\mu_0}} \quad (9)$$

V rámci odvození jsme zanedbali tíhovou a vztlakovou sílu. Výše uvedené odvození se týká magneticky měkkých a paramagnetických materiálů a předpokládá, že  $dB/dx$  a  $B$  jsou v místě separace přibližně konstantní.

#### Výpočty a závislost radiální rychlosti na velikosti zrna u almandinu:

Vypočtené hodnoty radiálních rychlostí platí pro případ laminárního proudění jednotlivých zrn ve vodě. Taktéž je to u níže uvedených obrázků 37, 38, a 39, které jsou tedy platné pouze v případě, kdy částici obtéká kapalina laminárně (tzv. laminární obtékání, které je vykresleno na obrázku 36). V tabulce 5, 7 a 9 jsou neměnné parametry užití při výpočtech radiální rychlosti pohybu částic pro minerály almandin, olivín a chromit.



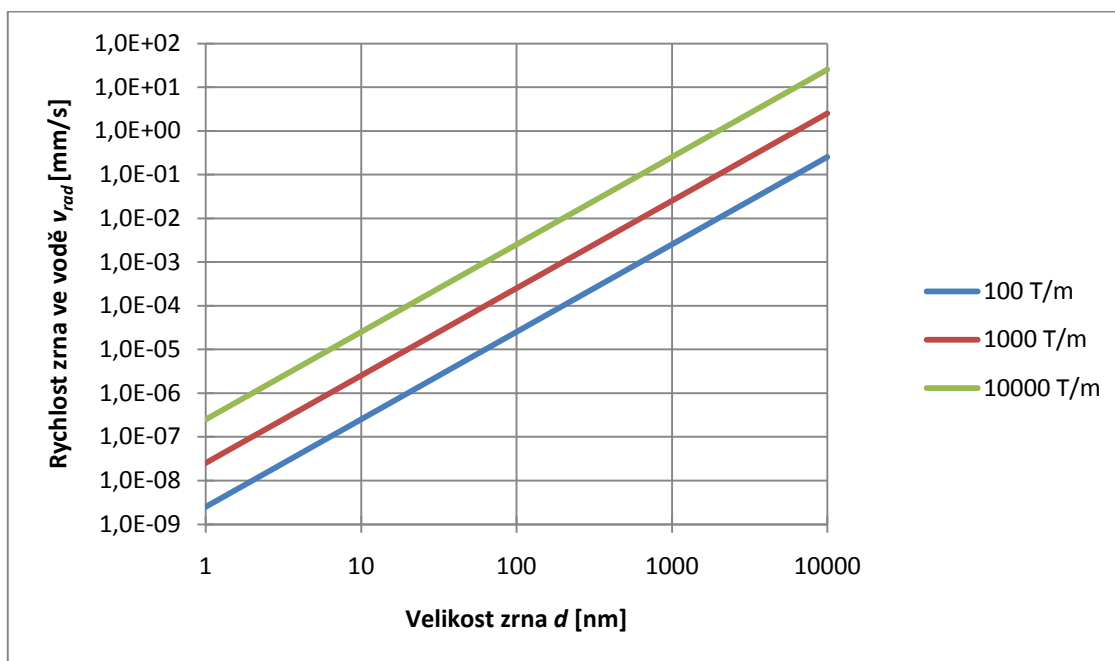
Obrázek 36 - obtékání částice kapalinou

Tabulka 5 - Neměnné parametry pro výpočet radiální rychlosti částic almandinu

Potřebné parametry	Hodnoty	Jednotky
$\kappa$	2,28E-03	[-]
$B$	0,25	[T]
$\mu_0$	0,000001256	[H/m]
$\eta$	1,00E-03	[Pa·s]

Tabulka 6 - Proměnlivé parametry pro výpočet radiální rychlosti zrn almandinu

Částice $d$ [nm]	$v_r$ [mm/s]		
	$B_r$ pro 100 [T/m]	$B_r$ pro 1000 [T/m]	$B_r$ pro 10000 [T/m]
<b>1</b>	2,52E-09	2,52E-08	2,52E-07
<b>10</b>	2,52E-07	2,52E-06	2,52E-05
<b>100</b>	2,52E-05	2,52E-04	2,52E-03
<b>1000</b>	2,52E-03	2,52E-02	2,52E-01
<b>10000</b>	2,52E-01	2,52E+00	2,52E+01



Obrázek 37 - graf radiální rychlosti zrna ve vodě na velikosti zrna pro almandin

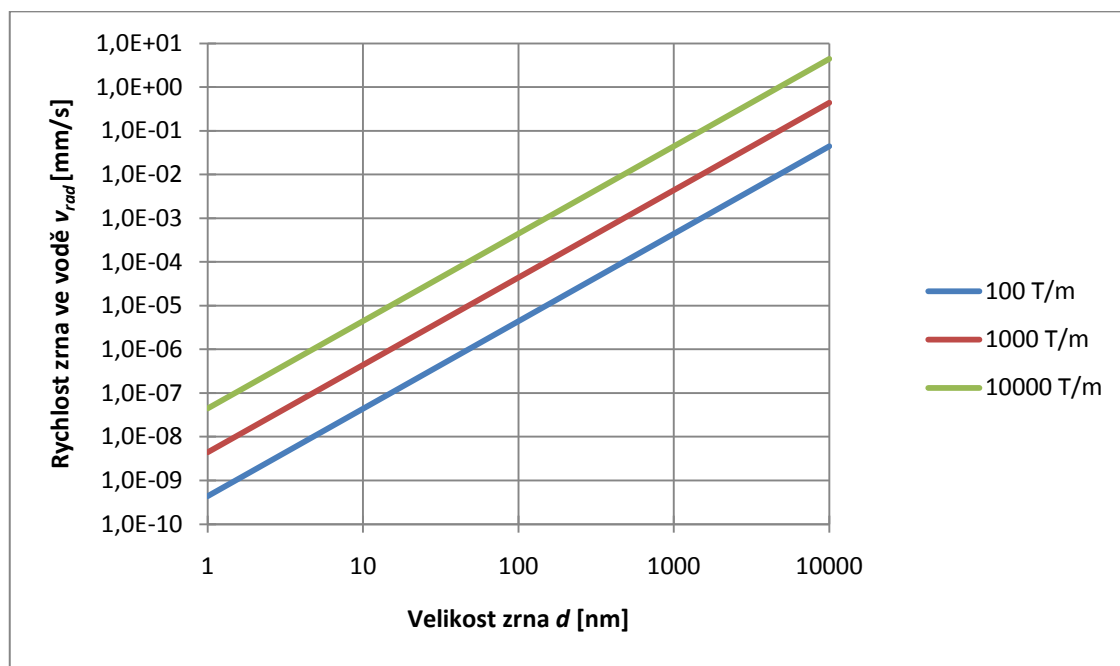
#### Závislost radiální rychlosti na velikosti zrna u olivínu:

Tabulka 7 - Neměnné parametry pro výpočet rychlosti zrn olivínu

Potřebné parametry	Hodnoty	Jednotky
$\kappa$	3,99E-04	[-]
$B$	0,25	[T]
$\mu_0$	0,000001256	[H/m]
$\eta$	1,00E-03	[Pa.s]

Tabulka 8 - Proměnlivé parametry pro výpočet

Částice $d$ [nm]	$v_r$ [mm/s]		
	$B_r$ pro 100 [T/m]	$B_r$ pro 1000 [T/m]	$B_r$ pro 10000 [T/m]
<b>1</b>	4,41E-10	4,41E-09	4,41E-08
<b>10</b>	4,41E-08	4,41E-07	4,41E-06
<b>100</b>	4,41E-06	4,41E-05	4,41E-04
<b>1000</b>	4,41E-04	4,41E-03	4,41E-02
<b>10000</b>	4,41E-02	4,41E-01	4,41E+00



Obrázek 38 - graf radiální rychlosti zrna ve vodě na velikosti zrna pro olivín

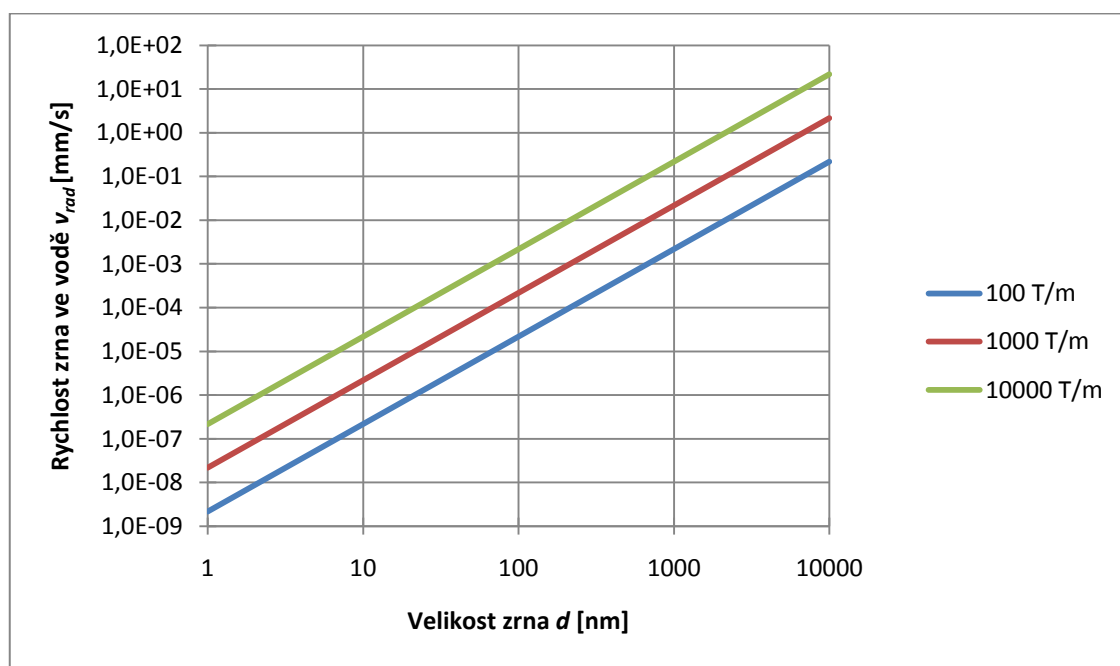
Výpočty a závislost radiální rychlosti na velikosti zrna u chromitu:

Tabulka 9 - Neměnné parametry u chromitu

Potřebné parametry	Hodnoty	Jednotky
$\kappa$	1,96E-03	[-]
$B$	0,25	[T]
$\mu_0$	0,000001256	[H/m]
$\eta$	1,00E-03	[Pa·s]

Tabulka 10 - Nestálé parametry pro výpočet rychlosti

Částice $d$ [nm]	$v_r$ [mm/s]		
	$B_r$ pro 100 [T/m]	$B_r$ pro 1000 [T/m]	$B_r$ pro 10000 [T/m]
<b>1</b>	2,17E-09	2,17E-08	2,17E-07
<b>10</b>	2,17E-07	2,17E-06	2,17E-05
<b>100</b>	2,17E-05	2,17E-04	2,17E-03
<b>1000</b>	2,17E-03	2,17E-02	2,17E-01
<b>10000</b>	2,17E-01	2,17E+00	2,17E+01



Obrázek 39 - graf radiální rychlosti zrna ve vodě na velikosti zrna pro chromit

Uvedené výpočty se vztahují pouze k modelové situaci. Předpokládá se, že gradient magnetického pole, stejně jako hodnota magnetické indukce  $\vec{B}$ , je v určité oblasti magnetického separátoru přibližně konstantní.

### 3.2.2 Kvalitativní popis separace směsi materiálů

Jestliže by bylo abrazivo separováno ze směsi produktů vytvořené abrazivním kapalinovým paprskem, potom by se toto abrazivo mělo chovat podle uvedeného modelu. Problémem magnetické separace může být např. zrnitost studovaných materiálů, jelikož velikost částic není stejná. Všechny částice nejsou stejně velké.

Zrna abraziva po recyklaci nejsou již tak pevná jako je tomu u zrn čerstvých. Čerstvými zrny se rozumí zrna odebraná přímo z dolu, která ještě neprošla procesem recyklace. Na řezání, obrábění abrazivním kapalinovým paprskem má právě vliv také pevnost jednotlivých zrn. Zrna, která prošla procesem recyklace, tedy nebudou tolik účinná při obrábění, řezání materiálu abrazivním kapalinovým paprskem jako je tomu u zrn čerstvých. [10] Účinnost abraziva z hlediska recyklace a velikosti zrna při řezání kapalinovým paprskem je zobrazeno na obrázku 40.

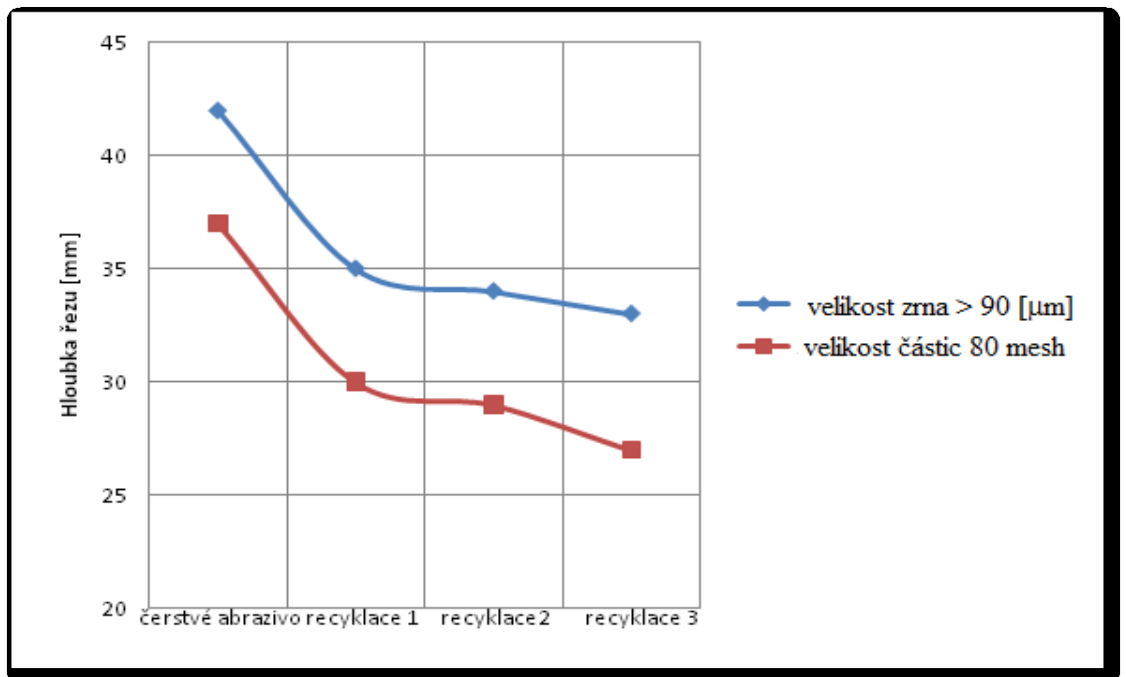
Babu a Krishnaiah Chetty uvádí ve svém článku „A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining“, že má recyklované abrazivo nižší pevnost a tato pevnost klesá v závislosti na počtu recyklací. To je nepříznivý jev, se kterým je potřeba počítat ve složitějších recyklačních modelech. [10] Z předchozích poznatků, jak již bylo zmíněno, částice abraziva menší než 90  $\mu\text{m}$  nejsou vhodná k opětovné aplikaci do abrazivního kapalinového paprsku na úpravu materiálů [9]. Tyto poznatky naznačují, jak je nezbytný správný výběr abrazivního materiálu pro dosažení lepších výsledků. Z hlediska dopadu na životní prostředí by mohla být magnetická separace přínosem, nemělo by se ale zapomínat právě na to, že separovaná zrna mají nižší pevnost. Z toho totiž vyplývá větší spotřeba separovaného abraziva než v případě původního abraziva.

Návrh jednoduchého procesu recyklace, bez uvážení ekonomické stránky procesu, je graficky vyobrazen, včetně jednotlivých fází, na obrázku 41.

V I. fázi procesu recyklace vstupuje směs abrazivního materiálu spolu s těžkými kovovými zrny, horninami a minerály do průmyslové odstředivky, kde dochází k odstředění těchto složek od vody s obsahem nanočástic.

V další fázi bych navrhovala separaci těchto abraziv na magnetické a nemagnetické podíly pomocí jednoduchého magnetického bubnového separátoru, který pracuje za mokra. Po této separaci získáme magnetické částice a ty poté pokračují na vysoušení - na pás.

Pásen prochází vysoušecí vzduch a suché magnetické zrna mohou být po skončení tohoto procesu znovu navraceny jako druhotná surovina pro účely hydroabrazivního obrábění. Recyklované abrazivo nebude již v takové kvalitě jako původní, čerstvé abrazivo. Lze jej ovšem použít pro řezání či obrábění měkkých materiálů.



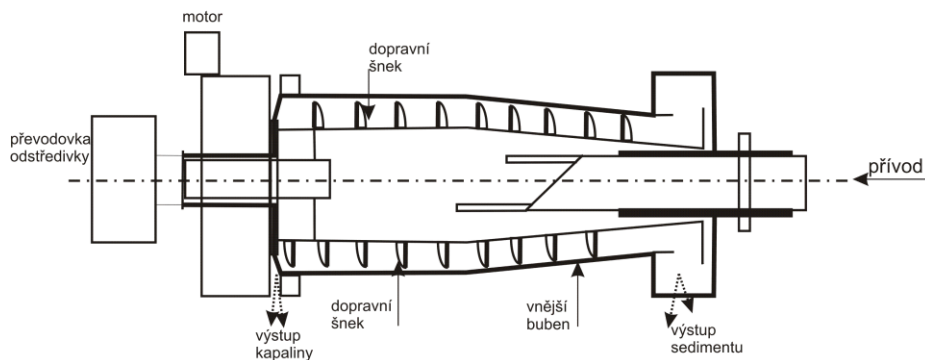
Obrázek 40 - Efekt recyklovaného a čerstvého abraziva na hloubku řezu [10]



**Jednotlivé fáze celého procesu recyklace abraziva:**

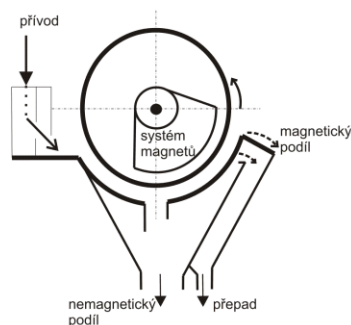
**I. fáze**

Separace nanočástic hornin a abraziva  
(těžkých kovových zrn) pomocí  
průmyslové odstředivky



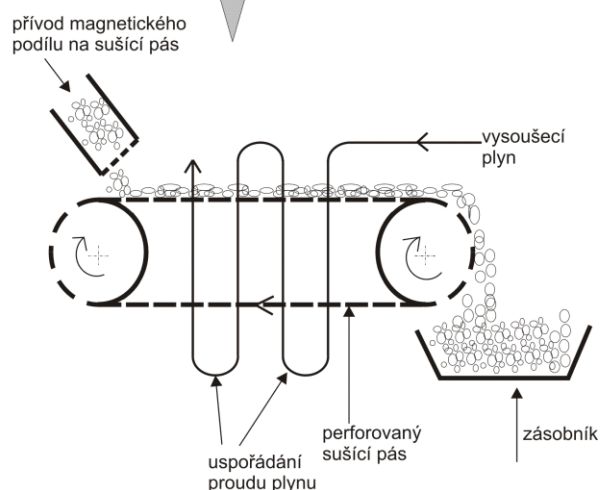
**II. fáze**

Magnetická separace magnetických  
a nemagnetických podílů  
pomocí bubnového rozdělovače  
(mokrý magnetická separace)



**III. fáze**

Vysoušení magnetického  
podílu na sušícím pásu  
prostřednictvím proudění plynu



Obrázek 41 - fáze procesu magnetické separace (překresleno podle [32, 33])

### 3.3 Závěr

Cílem diplomové práce byla analýza možnosti recyklace abraziva, které vzniká při obrábění materiálu vysokorychlostním hydroabrazivním paprskem, založené na magnetické separaci.

Z výsledku měření pomocí VSM magnetometru a následných přepočtů byly získány hodnoty susceptibilit pro studované práškové abraziva. Pro almandin byla naměřena susceptibilita 0,0023, u olivínu 0,0004, u chromitu 0,002 a pro zirkon to byla hodnota 0,00005. Z výsledků je zřejmé, že je zirkon slabě magnetický, ostatní minerály pak paramagnetické a ferimagnetické.

Klíčovým výsledkem praktické části diplomové práce je výpočet radiální rychlosti pohybu částic v jednoduchém modelovém magnetickém separátoru. Radiální rychlost zrna almandinu o průměru 100 nm při  $B = 0.25$  T a  $dB/dx = 1000$  [T/m] je 0,000252 [mm/s], při stejných parametrech je radiální rychlost zrna pro olivín 0,0000441 [mm/s] a pro chromit 0,000217 [mm/s]. Z těchto velmi malých rychlostí je vidět, že u malých a slabě magnetických částic je potřeba velkých gradientů magnetické indukce. U větších částic je již radiální rychlost separace dostatečná.

Na základě experimentálních měření a provedených teoretických analýz lze stanovit závěr, že minerální abraziva složená z almandinu, chromitu nebo olivínu, při běžné velikosti částic od stovek nanometrů do stovek mikrometrů, lze v rámci recyklace magneticky separovat při použití velkého gradientu magnetické indukce. V rámci recyklačního procesu je potřeba brát v úvahu sníženou pevnost recyklovaného abraziva a další ekologickou zátěž spojenou s dalšími fázemi recyklace, jako je vysoušení nebo odstředování.

V pokročilejší analýze by se měla brát v úvahu právě ekonomická stránka věci, úzce spjata s odběrem energií. Z pohledu analýzy provedené v této diplomové práci není jasné, zda se celý proces recyklace vyplatí, jak z hlediska čistě ekonomického, tak environmentálního. Problém je příliš složitý a zasluhuje další pozornost.

## Použitá literatura

- [1] Česká republika. ZÁKON č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: *Systém ASPI*. 2001.
- [2] Magnetismus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetismus>
- [3] JANDAČKA, Petr. *Měrné povrchové energie křehkých materiálů pro účely ovlivňování kvality povrchu*. Ostrava, 2009. Doktorská dizertační práce. VŠB - TUO.
- [4] Řezání vodním paprskem. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 30. 12. 2011 [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Řezání\\_vodním\\_paprskem](http://cs.wikipedia.org/wiki/Řezání_vodním_paprskem)
- [5] HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (laser/vodní paprsek) ve strojírenství*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
- [6] HLAVÁČ, Libor. *Makroskopický fyzikální popis interakce kapalinového paprsku vysoké energie s materiálem: Macroscopic physical description of high-energy liquid jet interaction with material*. V Praze: České vysoké učení technické, 2006, 30 s. ISBN 80-010-3465-8.
- [7] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Cerm, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [8] JÁCHYM, Jan. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] MARTINEC, Petr, Josef FOLDYNA, Libor SITEK, Jiří ŠČUČKA a Jaroslav VAŠEK. *Abrasives for AWJ cutting*. Ostrava: Lion, 2002. ISBN 80-86407-02-0.
- [10] BABU, M. Kantha a O.V. Krishnaiah CHETTY. A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining. *Elsevier*. 2003, č. 1.
- [11] LIU, Hua. *A study of the cutting performance in abrasive waterjet contouring of alumina ceramics and associated jet dynamic characteristics*. Queensland, 2004. Doctor of Philosophy. Queensland University of Technology.

- [12] *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz fyziky*. Praha: Prometheus, v roce 2001. ISBN 80-7196-151-5.
- [13] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, v roce 2003. ISBN 80-214-1868-0.
- [14] Magnetit. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetovec>
- [15] KITTEL, Charles. *Úvod do fyziky pevných látek*. Praha: Academia, 1985. ISBN 1-206881-4284/86.
- [16] Magnetické vlastnosti látek. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2012, č. 1 [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [17] HATCH, Gareth P. a Richard E. STELTER. Magnetic design considerations for devices and particles used for biological high-gradient magnetic separation (HGMS) systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001, č. 1.
- [18] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1983, 669 s.
- [19] VIDLÁŘ, Jiří, Zdeňka RŮŽIČKOVÁ a Jaroslav SRB. *Úprava druhotných surovin*. Ostrava: VŠB - TUO, 1985.
- [20] DINTER, Oskar. *Základy úpravy uhlí a rud*. Praha: SNTL, 1966.
- [21] BROŽ, Jaromír, Vladimír ROSKOVEC a Miloslav VALOUCH. *Fyzikální a matematické tabulky*. Praha: SNTL, 1980.
- [22] DINTER, Oskar. *Úprava nerostných surovin*. 2., upravené vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [23] Úprava surovin [online]. Copyright © 2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/64815228/26/Magneticke-rozdruzovani>
- [24] SVOBODA, J. a T. FUJITA. Recent developments in magnetic methods of material separation. *Minerals Engineering*. 2003, roč. 16, č. 9, s. 785-792. ISSN 08926875. DOI:

10.1016/S0892-6875(03)00212-7.

Dostupné

z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687503002127>

[25] *Jelínek Trading: vracíme suroviny zpět do života* [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.jelinek-trading.cz/>

[26] *Magsy, s.r.o.* [online]. Copyright © 2005 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.magsy.cz/page/1652.magneticke-separatory-suche-smesi-automaticke-cistení/>

[27] *WAMAG, spol. s r.o.* [online]. 2005 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.wamag.cz/1-uvod.html>

[28] CAGAŠ, Zdeněk. *Fyzikální způsoby úpravy 2*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1985.

[29] KORBEL, Petr a Milan NOVÁK. *Minerály: encyklopedie*. 3. vyd. Čestlice: Rebo, 2007, 296 s. Encyklopedie (Rebo). ISBN 978-80-7234-666-0 (Váz.).

[30] PELLANT, Chris. *Horniny a minerály*. Vyd. 3., (V Euromedia Group 1.). Překlad Olesa Pašková, Josef Rubín. V Praze: Knižní klub, 2005, 256 s. Příroda v kostce. ISBN 80-242-1416-4.

[31] HUNT, Christopher, Bruce MOSKOWITZ a Subir BANERJEE. *Magnetic Properties of Rocks and Minerals*. Elsevier. 2003.

[32] NOVÁČEK, Jiří. *Pomocné procesy II*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1998, 83 s. ISBN 80-707-8480-6.

[33] LYČKOVÁ, Barbora, Peter FEČKO a Radmila KUČEROVÁ. *Technologické postupy pro zpracování odpadních kalů*. Zpracování kalů: Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů [online]. 2008, č. 639 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/postupy.html>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - abrazivní kapalinový paprsek v Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. ....	6
Obrázek 2 – zblízka hlava abrazivního kapalinového paprsku v Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. ....	6
Obrázek 3 - Schéma čistého kapalinového paprsku .....	7
Obrázek 4 - systém hydroabrazivního zařízení .....	8
Obrázek 5 - schéma kapalinového paprsku s abrazivem .....	9
Obrázek 6 - Rozpad abrazivních zrn ve směšovací komoře abrazivním kapalinovým paprskem [6].....	10
Obrázek 7 - magnetizační křivka pro diamagnet.....	17
Obrázek 8 - magnetizační křivka pro paramagnet .....	17
Obrázek 9 - magnetizační křivka fero - a feri - magnetu (pro magneticky měkký materiál), .....	18
Obrázek 10 - magnetizační křivka fero - a feri - magnetu (pro magneticky tvrdý materiál), .....	18
Obrázek 11 - princip magnetické separace.....	20
Obrázek 12 – jednoduché schéma magnetického rozdělování.....	21
Obrázek 13 - magnetický válečkový - deviační separátor s permanentními magnety .....	23
Obrázek 14 - schéma separátoru HGMS .....	25
Obrázek 15 - suchý nízkointenzitní magnetický separátor .....	25
Obrázek 16 - uspořádání pólů v magnetických bubnových separátorech.....	27
Obrázek 17 - graf spotřebovaného abraziva za 20 dní .....	31
Obrázek 18, 19 - almandin.....	31
Obrázek 20, 21 – olivín.....	32
Obrázek 22, 23 - zirkon .....	32
Obrázek 24 - chromit .....	32
Obrázek 25 - Zrnitostní křivky sledovaných abraziv .....	33
Obrázek 26 - magnetizační křivka almandinu.....	35
Obrázek 27 - magnetizační křivka pro olivín .....	35
Obrázek 28 - magnetizační křivka pro chromit .....	36
Obrázek 29 - magnetizační křivka zirkonu .....	36
Obrázek 30 - magnetizační křivky všech měřených abrazivních materiálů .....	37
Obrázek 31 - proložení experimentálních dat přímkou pro almandin .....	38
Obrázek 32 - proložení experimentálních dat přímkou pro olivín .....	38
Obrázek 33 - proložení experimentálních dat přímkou pro chromit .....	39
Obrázek 34 - Susceptibilita u zkoumaného abraziva.....	40
Obrázek 35 - Princip magnetického rozdělování .....	41
Obrázek 36 - obtékání částice kapalinou .....	43
Obrázek 37 - graf radiální rychlosti zrna ve vodě na velikosti zrna pro almandin .....	44
Obrázek 38 - graf radiální rychlosti zrna ve vodě na velikosti zrna pro olivín .....	45
Obrázek 39 - graf radiální rychlosti zrna ve vodě na velikosti zrna pro chromit.....	46
Obrázek 40 - Efekt recyklovaného a čerstvého abraziva na hloubku řezu .....	48
Obrázek 41 - fáze procesu magnetické separac.....	49

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - vybrané parametry magnetizační křivky pro feromagnety [21] .....	19
Tabulka 2 - Technické parametry abraziva [3, 9, 28, 29, 30, 31, dodací listy k zakoupenému materiálu – VŠB - TUO].....	29
Tabulka 3 - hmotnost zkoumaných abraziv .....	34
Tabulka 4 - Hodnoty susceptibility u studovaných abraziv .....	39
Tabulka 5 - Neměnné parametry pro výpočet radiální rychlosti částic almandinu .....	43
Tabulka 6 - Proměnlivé parametry pro výpočet radiální rychlosti zrn almandinu .....	44
Tabulka 7 - Neměnné parametry pro výpočet rychlosti zrn olivínu .....	44
Tabulka 8 - Proměnlivé parametry pro výpočet .....	45
Tabulka 9 - Neměnné parametry u chromitu .....	45
Tabulka 10 - Nestálé parametry pro výpočet rychlosti .....	46